THE CANADIAN MODEL FOREST NETWORK

MODEL FOREST NETWORK
RÉSEAU DE FORÊTS MODÈLES

LE RÉSEAU CANADIEN DE FORÊTS MODÈLES

Natural Resources Canada
Canadian Forest Service
Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts

Canada

101-05195/

CANADA'S MODEL FOREST PROGRAM

Carbon Budget Accounting at the Forest Management Unit Level:

An Overview of Issues and Methods

July 2000

+1

The Canadian Forest Service:

Mission: "To promote the sustainable development of Canada's forests and competitiveness of the Canadian forest sector for the well-being of present and future generations of Canadians".

Canada has taken the lead in researching ways to sustain and enhance our forests. The Government of Canada, through the Canadian Forest Service, initiated the Model Forest Network in 1992. It introduced this system of 11 Canadian and a number of international research sites "dedicated to building partnerships locally, nationally, and internationally to generate new ideas and on-the-ground tools for sustainable forest management". This process has brought together hundreds of partners including academia, industry, government, communities, aboriginal peoples, the public, and other stakeholders.

The Canadian Forest Service of Natural Resources Canada is also a principal partner in each of the eleven model forest organizations and provides primary funding and administrative support to Canada's Model Forest Program.

Web site: **www.NRCan.gc.ca**

What is a Model Forest?

A model forest is a place where the best sustainable forest management practices are developed, tested and shared across the country. Each model forest is run by a not-for-profit organization, and, except for a small administrative staff, all those involved in the model forest not only donate their time and expertise, but usually bring additional financial support.

At the heart of each model forest is a group of partners having different perspectives on the social, economic and environmental dynamics within their forest – perspectives that are necessary to make more informed and fair decisions about how to manage the forest. The real "model" in these forests is the way the different partners – logging companies, Aboriginal communities, maple syrup producers, woodlot owners, parks, environmentalists, universities, government agencies, recreational groups, community associations, hunters, trappers - have integrated their own interests into their common goal of developing approaches to sustainable forest management that do not sacrifice one interest for another.

Although the model forest organization itself does not have jurisdiction over the land it uses as a testing ground, those who do have jurisdiction are participants. By being involved from the outset in developing new, on-the-ground approaches and solutions for sustainable forest management, those with land management responsibilities are increasingly adopting many of the model forest suggestions.

Model Forest Network web site: **www.modelforest.net**

Print: Cat. Fo42-312/2000E
ISBN 0-662-29244-8

PDF: Cat. Fo42-312/2000E-IN
ISBN 0-662-29245-6

Copies of this publication may be obtained free of charge from:

Canada's Model Forest Program
Natural Resources Canada
Canadian Forest Service
580 Booth Street, 7-C4
Ottawa, ON
K1A 0E4

Telephone: (613) 992-5874
Fax: (613) 992-5390

Web site: **www.modelforest.net**

Cette publication est également disponible en français sous le titre
La compatabilité du bilan du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier : aperçu des enjeux et des méthodes.

Carbon Budget Accounting at the Forest Management Unit Level:

An Overview of Issues and Methods

The present report has been prepared by a consultant, Martin von Mirbach, for the information purposes of the Canadian Model Forest Network. This is not an official publication of the Canadian Forest Service or Canada's Model Forest Program. Any opinions expressed do not necessarily reflect the views of the Canadian Forest Service or the Canadian Model Forest Network.

Prepared for:
Canadian Model Forest Network

Prepared by:
Martin von Mirbach
20 Elford Avenue
Corner Brook, NF A2H 2N1
Tel: (709) 634-0371
E-mail: alterego119@hotmail.com

June 2000

Summary

This report has been prepared in response to an identified need to provide guidance to forest managers seeking to report on a carbon budget at the scale of the forest management unit (FMU). This effort has been supported by the Local Level Indicators Strategic Advisory Committee of the Canadian Model Forest Network.

A brief overview of work on carbon budgeting across the Model Forest Network shows that only at the Foothills Model Forest has there been any comprehensive effort made to report on carbon fluxes in the forest. Many model forests have expressed the view that the issue is best dealt with at a provincial or national level, rather than at a FMU level. This report takes a different view and argues that preliminary carbon budgeting at the FMU level will, in many cases, not present any insurmountable challenges and, moreover, if carbon accounting is to actually influence management decisions then it must be brought down to the forest management unit scale.

Carbon is present in living biomass, dead or decomposing organic matter, soil organic matter, mineral soils and forest products. These carbon "pools" are not stable and they change in different ways, with carbon being added to each pool through a variety of natural and anthropogenic causes and leaving the pool at varying rates either to enter another pool or to be re-emitted into the atmosphere.

Carbon budgeting can be broken down into three distinct tasks:

- Obtaining a baseline measurement of the amount of carbon in a particular forest at a given time;
- Measuring the change to that stock over time; and
- Evaluating the likely impact of various management activities on future changes to the carbon budget.

Each of these is discussed in turn, describing the information that is needed by forest managers in order to apply these steps in their particular forest management unit. These methods can be used in three different ways to track changes over time to the carbon stocks: by comparing successive baseline measurements; by tracking changes since one baseline measurement; or by measuring changes on their own, without reference to a baseline. The advantages and disadvantages of each method are discussed briefly.

This report focuses on how to use existing inventories to record carbon stocks and fluxes. The use of direct measurement and remote sensing have an important potential role to play in carbon budgeting, but are not discussed in this report because at the present time their successful application to carbon budget estimation is still dependent upon good baseline estimates derived from inventory-based carbon budget assessments.

The challenge of recording changes to the forest products pool is dealt with separately from the challenge of recording changes in the forest.

The Canadian Forest Service has developed a number of tools to assist in carbon budget modelling, including a model for the Canadian forest sector and one specifically for the forest products sector. These models are briefly described, along with initiatives to apply these models at the level of a forest management unit.

The report concludes with a listing of some activities that could help to store carbon in forests.

Key Messages and Recommendations

To forest managers:

1. Measuring carbon and carbon fluxes at the forest management unit level is not technically difficult and can be done with data that is readily available to most forest managers.

2. Although initial measurements are likely to be somewhat imprecise and may not include all carbon pools, that in no way invalidates their usefulness to forest managers who wish to incorporate an awareness of climate change issues in their assessments, plans, monitoring and reporting.

3. Forest managers should report on the best available information rather than waiting for "perfect" information to become available. Reporting now is the best way to generate the commitment to refine and improve upon initial estimates.

4. Several reports, available from the Canadian Forest Service's Northern Forest Centre, provide enough information to get started. "The carbon budget of the Canadian forest sector" (Kurz *et al* 1992, Information Report NOR-X-326) provides an excellent overview of the CFS Carbon Budget Model, while "A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils (Siltanen *et al* 1997) provides the necessary data on regional soil profiles. Other reports include, "A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector" (Kurz and Apps 1999) and "Carbon budget of the Canadian forest product sector" (Apps *et al* 1999). Carbon conversion factors are included in Figure 1 above (p.5). The other information needed to get started – volume of timber, growth yield curves, information about logging and natural disturbances – must be obtained locally.

5. There are several forest management measures that can augment the ability of forests to store carbon, and that are consistent with sustainable forest management. Long-term approaches that increase the overall storage of carbon (measured as tonnes/hectare/year, averaged out over a century or more) are more valuable than approaches that focus primarily on increasing the rate of short-term sequestration.

To the Model Forest Network:

6. The Model Forest Network is well situated to play an important role in promoting the development of a universal carbon budget model that could be easily used with commonly available information by any forest manager. The Canadian Forest Service already has most of the elements needed to create a credible, easy-to-use universal model and the support of and collaboration from the Model Forest Network could help to make this a priority.

Table of Contents

Summary i

Key Messages and Recommendations ii

1. Introduction 1
1.1 Context 1
1.2 Purpose 1

2. Key Concepts 2

3. Tasks 4

4. Methods 4

5. Model Forests and Carbon Accounting 5

6. Obtaining Baseline Measurements 5
6.1 Carbon in living biomass 5
6.2 Soil carbon 6

7. Estimating Carbon Fluxes 6
7.1 Comparing successive baseline measurements 7
7.2 Baseline plus estimated stock changes 7
7.3 Measuring flux alone (Net Biome Production) 8
7.4 Summary 8

8. Carbon in Forest Products 8
8.1 Determining initial contributions to the forest products carbon pool 8
8.2 Forest product decay rates 9

9. Carbon Budget Modelling 9
9.1 The CFS Carbon Budget Model 10
9.2 Local level applications of the CFS Carbon Budget Model 10
9.3 A universally applicable carbon budget model 11

10. Forests, Sustainable Forest Management and Climate Change 11

11. Key Messages and Recommendations 12

12. Acknowledgements 13

13. References 13

1. Introduction

1.1 Context

It is now generally agreed that global climate is being affected by human activities that result from the emission of certain greenhouse gases into the atmosphere. There are three main ways that forests and forest management are relevant to climate change issues:

a) The forest industry and its related infrastructure produce significant emissions of greenhouse gases in its upstream activities (site preparation, silviculture, logging, transportation to mills), manufacturing processes, and downstream activities (transportation to markets, as well as emissions resulting from decomposition and recycling). Efficiencies that result in reduced emissions of greenhouse gases would help to mitigate climate change.

b) Forests are significant reservoirs of carbon. Compounds of carbon such as carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and certain organic molecules are the major greenhouse gases. When carbon is stored in forests (in living biomass, dead biomass or soils) or in forest products it is not in the atmosphere. Loss of forests on a global scale is a significant contributing factor in climate change. On the other hand, the possibility of expanding carbon storage in forests (i.e., creating "sinks") has been identified as a potential short-term measure to mitigate climate change.

c) Forests are vulnerable to climate change and are expected to react in a variety of ways that are not yet reliably predictable. A longer growing season may result in enhanced growth which may be partially or fully offset by increased respiration. Shifting climatic zones may enable forests to become established in regions currently unforested (although in many such regions the soils may not be present to support forests). On the other hand, shifting climatic zones may increase trends towards forest loss or even desertification in some regions of the world and predicted impacts such as drought and extreme weather events may increase the frequency and scale of disturbances such as fire, insects and storm damage.

This report is mainly concerned with the second of these three points, without in any way seeking to diminish the importance of the other two considerations.

The importance of the Canadian forest sector "carbon budget" is recognized in the Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management framework that was developed for the Canadian Council of Forest Ministers. Criterion Four acknowledges the importance of forest ecosystem contributions to global ecological cycles, and nine of the indicators deal specifically with information needed to determine a forest sector carbon budget.

There are several distinct reasons why it is important to measure and report on forest sector carbon budgets. Carbon budgets record whether and how forests are contributing to or mitigating climate change. They promote better understanding of the varied and complex ways that forests respond to and affect climate. Finally, and perhaps most importantly, they allow forest managers to include carbon storage as one of the factors to be considered when evaluating different management options.

For this latter potential to be realized, however, it is crucial that carbon accounting be brought down from global and national scales to the scale most relevant to a particular forest manager; namely a forest management unit. This has not yet been done in a systematic and universally accepted way, however, and there is therefore an opportunity for the Canadian Model Forest Network to demonstrate leadership in this regard.

1.2 Purpose

The purpose of this report is to provide an overview of the tools that are available or in development to enable forest managers to track changes in carbon storage in forests at the local level. It also reviews the applicability of the Canadian Forest Service's Carbon Budget Model at the forest management unit level, enabling forest managers to assess how management decisions can be expected to impact on carbon storage at the local level.

2. Key Concepts

The definitions and clarifications in this section are intended to introduce a few key concepts, especially in areas where there is frequent confusion. These are not intended to be rigorous technical definitions.

Carbon, CO_2, and CH_4: When carbon is measured in trees or soils it is usually described in units of carbon. When organic matter carbon decomposes and enters the atmosphere it does so primarily as carbon dioxide which is why greenhouse gas emissions are measured as tonnes of CO_2. A tonne of carbon, if allowed to decompose and return to the atmosphere, produces 3.667 tonnes of CO_2. Likewise, creating a new reservoir of a tonne of carbon is the equivalent to a 3.667 tonne reduction in CO_2. Under anerobic (oxygen depleted) conditions such as those found in low-land or peat-forming forests, methane (CH_4) is produced and can make a large contribution to the net greenhouse gas flux. Methane is a more active greenhouse gas than CO_2 (from an atmospheric impact point of view, 1 tonne of CH_4 is equivalent to approximately 20 tonnes of CO_2).

Forest carbon pools: There is carbon in living biomass, dead or decomposing organic matter, soil organic matter, mineral soils and forest products. These categories often get lumped together into a few clusters but different accounting methods do this differently. Some distinguish between above-ground and below-ground carbon while others distinguish between biomass and soil carbon. There does not seem to be consistency among scientists about precisely when decaying woody material changes from biomass to soil. This probably doesn't matter much for a forest manager but it is worth noting that different carbon budget models use different rules to determine how carbon from the biomass pool enters the soils pool.

Different levels of detail in any carbon accounting system are briefly discussed below.

Net Primary Production: The total amount of photosynthesis minus the total amount of plant respiration. Photosynthesis, which sequesters carbon, tends to be highest during the day and during the summer but some of this sequestered carbon is re-emitted through plant respiration at night and during winter.

Net Ecosystem Production: Net Primary Production minus losses due to decomposition as leaf litter, dead trees, roots and fallen branches decay, and as the tree itself succumbs to rot.

Net Biome Production: Net Ecosystem Production minus losses due to disturbances including natural disturbances such as fire, insects, disease and windthrow as well as anthropogenic disturbances such as logging and deforestation.

Forest Sector Accounting: Achieving truly full carbon accounting for the forest sector is perhaps an abstract ideal. Full sector accounting would add to Net Biome Production, including the carbon added to the forest products carbon pool as well as any credit from the use of biomass energy to displace fossil fuels. Subtracted from that total would be the rate of decomposition of forest products as well as energy inputs throughout the forest management cycle (see item (a) in 1.1 above).

In general, an adequate carbon budget for a particular forest area will include Net Biome Production at a minimum. Usually some effort is made to include elements of a forest sector accounting system but in this case it is important to take a balanced approach to accounting for sources of carbon as well as sinks.

It is often assumed that the main purpose of carbon accounting is to support the objectives of international agreements on climate change and their reporting requirements. This need not necessarily be the case but to avoid confusion it is important to distinguish between the very different requirements of the two major legal instruments pertaining to climate change.

Framework Convention on Climate Change: Negotiations on the Framework Convention were completed at the Earth Summit in 1992 and it has since been ratified by enough countries (including Canada) that it has entered into effect. Signatory countries commit to promote the conservation

and enhancement of sinks and reservoirs, and to develop and publish national inventories of greenhouse gas emissions including anthropogenic activities related to sinks. The reporting requirements are mandatory, following somewhat flexible guidelines (IPCC 1997) with respect to land-use change and forestry. Notably, there are no legally binding emissions reduction targets in the Framework Convention.

The Kyoto Protocol: This is a subsidiary agreement to the Framework Convention agreed to in 1997 and signed but not yet ratified by Canada and not yet in force. It sets specific target levels that certain countries agree to conform to in their greenhouse gas emissions. Countries must include in their inventories any changes in carbon stocks between 2008 and 2012 due to afforestation, reforestation or deforestation activities since 1990 (in other words, only a very small area relative to the entire forest). There is also a provision that other land management activities may be included in national inventories. The rules for such other activities, as well as the precise definitions of afforestation, reforestation and deforestation, will not be determined until November 2000 at the earliest. Until these negotiations are completed there is considerable uncertainty about what forest activities are included in the Kyoto Protocol[1]. It is important to note that the accounting methods discussed in this report are not designed to address the measurement requirements under the Kyoto Protocol.

What does this mean for forest managers? Neither international agreement relates precisely to what is described in this report. The Framework Convention requires only that reporting take place on a national scale, while the Kyoto Protocol still has so many unresolved details that it is not possible to say what the accounting rules must include. Nevertheless, there is a strong case to be made that there is a need for local level implementation of the type of carbon accounting discussed in this report. If Canada is to promote the conservation and enhancement of forest sinks and reservoirs, actual on-the-ground activities in support of this objective must for the most part be carried out by local managers. They therefore need good information that will tell them what impact their management activities are having. An adequate carbon budget is an essential tool in this regard.

One final clarification is important; namely, the difference between sinks and reservoirs.

Sinks and reservoirs: A sink is an activity that removes (or "sequesters") carbon from the atmosphere and is the opposite of a "source." A reservoir, on the other hand, is the actual "pool" of carbon itself, safely stored in a form that keeps it out of the atmosphere for a short or long period of time. The difference between these two terms is crucial. A young growing forest, for instance, is a good carbon sink since it sequesters carbon at a high rate. An old forest, however, will generally be a better carbon reservoir since it stores a greater volume of carbon and it provides this service even though its growth has levelled off. So an old forest may be a good forest reservoir although a poor forest sink (or even a slight source). The "sinks" potential of a forest can be determined by measuring the extent to which more carbon is flowing into it than flowing out (IPCC 2000). The reservoir potential, on the other hand, can be measured by determining the tonnes of carbon per hectare per year, averaged out over a time scale at least as long as one full rotation period. The carbon accounting processes described in this report can be used for both calculations. It is worth noting in passing that the Kyoto Protocol recognizes the role of forest sinks while the Framework Convention places more emphasis on forests as carbon reservoirs. As policy instruments then, the two agreements have the potential to work at cross purposes. If forest management is to adequately consider the long-term scales (>100 years) appropriate to forest ecosystem cycles as well as in mitigating climate change, however, the role of forests as long-term carbon reservoirs is considerably more significant than their relatively short-term role as sinks.

[1] For example, the net impact of reforestation and deforestation in Canada, based on "business as usual" activities, is estimated to range between being a 21 Mt/year source of CO_2 and being a 10 Mt/year sink (Forest Sector Table 1998). This huge range is based entirely upon differing views about what might be included in the Kyoto Protocol.

3. Tasks

In essence, there are three tasks involved in carbon budgeting:

1. Obtaining a baseline measurement of the amount of carbon in the local area at a given time.

2. Measuring changes to that stock over time.

3. Evaluating the likely impact of various management activities on the forest's ability to serve as a carbon reservoir and incorporate that knowledge into the decision-making process.

Each of these tasks are considered respectively in Sections 6, 7 and 8 of this report.

4. Methods

There is currently a tremendous amount and diversity of scientific activity being carried out related to forests and carbon accounting, with a variety of methods used for measurement, modelling and accounting purposes. These methods also operate at widely different scales, an important factor when considering carbon budget accounting for forest management units.

Direct measurement: This is the finest level of detail and includes research into plant photosynthesis, decomposition rates, soil profiles, etc. The data from such small-scale studies, however, is difficult to "scale up" to estimate carbon throughout a forest management unit and is therefore not discussed in this report. Direct measurement is aimed more at quantifying carbon sinks and how they are influenced by environmental conditions than it is at estimating carbon reservoirs.

Inventory bookkeeping: This refers to the use of forest inventories and other information with sinks (Net Ecosystem Production, carbon in forest products) tallied on one side of the ledger and sources (disturbances, logging, forest product decay, other emissions) on the other side. This is the method that is generally used in developing forest carbon budgets at scales larger than the stand level. Of course, its accuracy depends on the completeness and accuracy of the information. As well, although there are soil profiles for much of Canada that include estimates of carbon content, other methods are needed to estimate the impacts that disturbances and forest management are likely to have on soil carbon pools.

Remote sensing: There are increasing efforts to employ remote sensing to provide global estimates of carbon fluxes in forests. Remote sensing can provide for greater consistency when trying to aggregate data from several inventories and can fill in gaps where inventory information is unavailable. However, remote sensing technologies have not yet been validated to provide an acceptable level of accuracy. As well, remote sensing is not an effective tool for measuring soil carbon. In general, remote sensing is finding its most valuable applications in helping to carry out global assessments of how climate change might be having an impact on forests around the world by tracking major disturbances, changes in the growing season, and Net Primary Productivity. Potential future applications also include using remote sensing data to scale process models built from direct measurement of carbon fluxes obtained from relatively few individual sites.

This report is based on the notion that the preferred method for carbon accounting at the forest management district level is likely to be through inventory bookkeeping methods with direct measurements to refine the accuracy of assumptions and remote sensing to help fill in gaps. Forest managers that do not have adequate timber inventories will not be able to easily obtain good baseline measurements but that doesn't necessarily prevent them from recording carbon fluxes.

There are more measurement methods than covered by this report. In particular, mention should be made of direct flux measurements through the use of flux towers, chambers, and aircraft which are used for model verification purposes. Chapter 2 of the IPCC's Special Report on Land Use, Land-use Change, and Forestry provides a concise summary of the various methods and their limitations.

5. Model Forests and Carbon Accounting

A quick scan across the Model Forest Network suggests that there is relatively little activity on carbon budgeting. The following are a few points that have been gleaned from the research carried out in compiling a reference document summarizing model forest accomplishments in using local level indicators, and from other sources.

Foothills Model Forest have no doubt done the most since they have actually produced a Carbon Budget Model for their forest. The results are discussed briefly in Section 8 below. The model used was developed and run by the Canadian Forest Service. This research project was performed to demonstrate the feasibility of performing such analyses at an operational scale. However, the model is not yet user-friendly enough that it could easily be used by forest managers on their own.

Fundy Model Forest has six indicators in the "Contributions to the Global Carbon Budget" section of the Model Forest Network's general matrix of indicators. However, that Model Forest believes that these indicators are non-functional at the local level and best left to provincial and federal agencies. Fundy had proposed a collaboration with Foothills Model Forest to test and refine the national assumptions relating to soil carbon but it did not receive sufficient support to be implemented. The problem seemed to be that the proposed project worked at the "micro" scale while the carbon budget modelling team at CFS is more concerned about the "macro" scale.

Western Newfoundland Model Forest has two indicators in the "Contributions to the Global Carbon Budget" section of the Model Forest Network's general matrix of indicators. However, it has not gathered data on these indicators. It is involved in a proposal to explore the possibility of gathering inventory information using a grid sampling method in such a way as to meet provincial reporting requirements and, at the same time, gather information usable at the FMU scale. It has also indicated an interest in learning the results of a national study being carried out by CFS which will assess the potential of remote sensing as a tool to measure biomass. Both of these studies will require considerable testing and evaluation before producing results that could be applied at the local level.

Lake Abitibi Model Forest has listed three indicators in the "Contributions to the Global Carbon Budget" section of the Model Forest Network's general matrix of indicators but has not yet completed its first data gathering exercise.

Eastern Ontario Model Forest is the first (and only) model forest to report on the current state of its forest across a broad range of indicators but its *State of the Forest Report* does not include a measure of the amount of carbon in the forest.

No other model forest has listed indicators under the category "Contributions to Global Carbon Budget."

6. Obtaining Baseline Measurements

6.1 Carbon in living biomass

This measurement is easily obtained provided that the amount of standing timber on the forest at a given time is known from a current forest inventory. The volume of timber needs to be converted to a total biomass volume and then converted into a mass of carbon or CO_2. The conversion factors provided in Figure 1 are based on those reported by the Intergovernmental Panel on Climate Change's Greenhouse Gas Inventory Guidelines *Reference Manual* and modified by Environment Canada using Canadian data. Even with these modifications, the conversion factors are only general approximations or averages. There may well be more accurate conversion tables, keyed to specific species, age classes and soil types, all of which can be expected to influence the ratio of below-ground to above-ground biomass. Nevertheless, these figures can provide a reasonable starting point and they are considered acceptable for national and international reporting requirements.

Figure 1: Conversion factors

1. To modify inside bolewood volume to include non-merchantable volume such as bark, tops and branches:
   Multiply bole volume by 1.454

2. To estimate below-ground volume:
   Multiply bole volume by .396

3. To obtain total wood volume:
   Add 1 and 2

4. To convert wood volume (m^3) to tonnes of dry matter biomass:
   Multiply wood volume by .43

5. To convert dry matter biomass to carbon:
   Multiply dry matter biomass by .5

6. To convert carbon to CO_2 equivalent:
   Multiply carbon by 3.6667

6.2 Soil carbon

There is data on soil carbon for sites across Canada in a study entitled *A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils* (Siltanen *et al* 1997). Information is based on profiles collected from 1462 sites across Canada. The results are generalized in Table 1 below, reproduced from that report. The site locations are shown on an accompanying map and the report comes with a disk that provides detailed information on each of these sites.

It's important to note that these soil profiles do not necessarily accurately predict the amount of carbon present on an actual site. They represent, however, the best available information for Canada as a whole and are generally considered to be of sufficient accuracy for carbon budgeting, modelling and reporting, although they could obviously be improved upon by using better local data or taking additional direct measurements in a particular forest management unit.

Many Canadian forest operations take place in imperfectly drained (low-land) forests where peat (or deep organic) soils prevail. Under these conditions, changes in methane (CH_4) production as well as CO_2 production contribute to the net greenhouse gas balance. At present, the Canadian Forest Service does not systematically include this methane, or peatland dynamics, in the carbon budget although CFS currently has an active program to include peatland processes (in low-land forests) in the carbon budget model.

Table 1: Mean organic carbon content (kg m^{-2}) by ecoclimatic province

Ecoclimatic province	Mineral horizons[a]	Organic horizons[b]
Arctic	8.4 ± 1.0 (76)[c]	3.4 ± 0.6 (25)
Subarctic	7.6 ± 0.5 (154)	3.9 ± 0.2 (150)
Boreal West	5.4 ± 0.2 (374)	2.7 ± 0.1 (370)
Boreal East	7.3 ± 0.3 (286)	3.8 ± 0.2 (286)
Cool Temperate	10.5 ± 0.8 (86)	2.0 ± 0.3 (86)
Moderate Temperate	7.0 ± 0.8 (3)	1.6 ± 0.4 (3)
Grassland	9.3 ± 1.6 (7)	3.0 ± 0.7 (7)
Subarctic Cordilleran	13.9 ± 1.9 (16)	2.2 ± 0.3 (16)
Cordilleran	8.5 ± 0.3 (326)	2.7 ± 0.1 (321)
Interior Cordilleran	7.5 ± 0.7 (67)	1.8 ± 0.2 (67)
Pacific Cordilleran	23.2 ± 1.9 (67)	4.6 ± 0.4 (67)

[a] All horizons below the mineral surface
[b] All horizons above the mineral surface. Not all profiles in the data set have data for organic horizons above the mineral surface. This summary includes only those profiles that have measured or estimated organic horizon data. This can result in a different sample size than that for the mineral horizon summary
[c] Mean ± standard error of the mean (sample size)

(Source: Siltanen *et al* 1997)

7. Estimating Carbon Fluxes

There are three ways to measure carbon fluxes in a particular forest area based on changes in forest ecosystem pools:

1) compare successive inventories;

2) use one inventory as a baseline and measure changes from that baseline by totalling additions and removals; or

3) measure additions and removals on their own without reference to a baseline.

All three are briefly discussed below. As mentioned previously, direct flux measurement methods – using towers, chambers and aircraft – are used in verifying

the models and their estimates and are not covered in this report.

7.1 Comparing successive baseline measurements

Section 6 above already explains how to use forest inventories to estimate the amount of carbon on a site. This estimate can easily be carried out on two or more successive inventories to show trends over time.

Advantages: Obviously, this is the easiest method; if the forest area has a regularly updated timber inventory, it is simply a matter of applying the conversion factors to two or more inventories. Another advantage is that historical records can be used to construct trends going back in time.

Disadvantages: If different methodologies are used in successive inventories, this will add error to the calculation. This error could be significant if the net changes of carbon in the inventories are small compared to the amount of carbon in the inventories. This method does not show what the main factors are in affecting carbon stocks in a particular area since all of the combined losses from logging, natural disturbances and deforestation will be rolled together. As well, this method does not, by itself, provide estimates of changes in soil carbon stocks. Such estimates would have to be separately measured or estimated using models.

7.2 Baseline plus estimated stock changes

In this method, one inventory is used as a baseline and then all deviations from it are recorded.

Additions: The additions to above-ground carbon stocks is the above-ground Net Ecosystem Productivity; this information is typically contained in growth yield curves and summarized in mean annual increment estimates. The conversion figures in Figure 1 should be used to derive carbon figures. Growth yield curves often do not extend back to cover the early years of stand development. This missing information can be filled in by drawing an exponential curve from zero to the first data point. Even a straight line will do; any inaccuracies will be quite small when compared with the overall carbon in the forest.

Withdrawals: Forest management records can usually supply the following, all of which are needed:

- volume of timber lost to fire, insects, disease and other natural disturbances (other than normal stand breakup, which is captured in the growth yield curves);
- volume of timber logged; and
- volume estimates of losses due to deforestation (road building, land-use conversion, hydro and other developments, etc). These figures may already be captured in the volume logged, in which case they need not be counted here although the area deforested will lessen the future productivity of the landbase.

All of the figures above will usually be available as a measure of volume of timber. The conversion factors in Figure 1 should be used to derive estimates of weight of carbon or CO_2.

These calculations will allow for a reasonably accurate assessment of fluxes in the standing biomass pool. Measuring changes in soil carbon pools is a bit trickier. See Section 8 for a brief overview of the Carbon Budget Model developed by the Canadian Forest Service. As well, see Section 9 for a discussion about tracking the flow of carbon through the forest products pool.

Advantages: This method is reasonably accurate and is basically the method followed in most carbon budget models. The information is usually available.

Disadvantages: The CFS Carbon Budget Model has not yet been made generally available for use by forest managers and, although the assumptions used by the model of how carbon enters and flows through the soil carbon pool are available, actually carrying out the calculations would be extremely labourious with the present

research-oriented version.

7.3 Measuring flux alone (Net Biome Production)

It is also possible to carry out carbon accounting without obtaining a baseline measurement, simply by recording the net effects of additions and withdrawals and report that as the change in carbon storage.

Advantages: This method may be particularly attractive in situations where the basic forest inventory has significant gaps in it since it does not presume to offer an absolute measure of carbon (which would likely be highly inaccurate) but only measures changes to carbon stocks over specified intervals.

Disadvantages: Changes in carbon stocks can only be reported in absolute terms (as tonnes of carbon lost or gained) and not as a percentage of the entire carbon pool. This may or may not be a significant disadvantage.

7.4 Summary

The section above has described, in the simplest terms possible, the "heart" of any carbon budgeting system.

In general, most forest managers with an adequate inventory would most conveniently use the baseline plus flux method since this is most consistent with practises followed elsewhere. However, measuring flux alone may be an attractive option in forests lacking an adequate timber inventory since this would meet the basic requirements of carbon accounting. Simply comparing baselines can be used as a "back of the envelope" initial calculation or, if adequate inventory information is available, can be used to plot rough historical trends.

In conclusion, there is nothing particularly technically complex or prohibitively expensive in carbon accounting at the forest management unit level.

Obviously, any accounting system will only be as accurate as the accuracy of the information going into it. Even a FMU with up-to-date information is likely to have a number of gaps, errors and uncertainties associated with the data. However, is it better to wait until perfect information is available, or to wade in and obtain, at relatively little cost and effort, the best estimates that can be derived from currently available information and then to use that initial work to guide efforts to improve upon and refine the estimates?

8. Carbon in Forest Products

Forest management actions can have a significant impact on the amount of carbon stored in forest products, which is affected by the volume of manufactured products, the types of products manufactured, the use to which the products are put and the methods used to dispose of or recycle them. Tracking net changes to the forest products pool requires consideration of factors described in this section and which have been built into the CFS Carbon Budget Models (CBM-CFS2 and CBM-FPS) described in section 9 below.

8.1 Determining initial contributions to the forest products carbon pool

This can be done in two ways: 1) based on logging volume, or 2) based on mill output.

The **logging volume method** can be used if the use the timber logged is going to is known. First, an appropriate utilization rate must be applied to the volume of timber logged (the CFS Carbon Budget Model uses figures of 80-85% of merchantable stem volume). Then, a number of assumptions must be made about what happens to that wood. The CBM-FPS describes a series of assumptions for several different forest products. Here is one of the more complex ones for illustrative purposes (Kurz *et al* 1992):

"Softwood sawlogs and veneer logs are converted to lumber with an assumed efficiency of 45%. Of the lumber produced, 70% is used for construction and 30% is used as 'other lumber,' including palettes, trim, and packaging. The by-products from the conversion process fall into three categories, as described by the following parameters:

1. 10% is used in production of panel board (added to the 'other lumber' pool);

2. 45% is used for pulp chips; and

3. The remaining 45% is treated as residue, with two-thirds burned as waste and one-third burned for energy."

More accurate assumptions could be made based on local uses but this gives an example of the level of detail used in the CFS model.

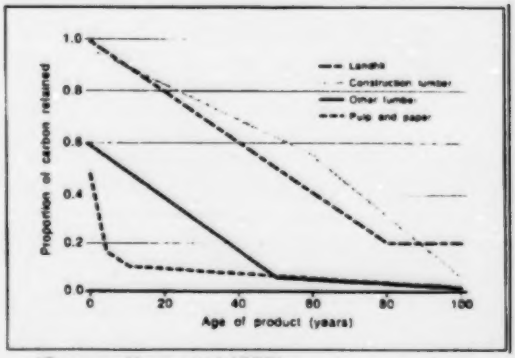
The **mill output method** involves simply recording the volume of output from the various mills in a particular FMU. This method saves having to make the various assumptions described above, but introduces complexities of its own. For one thing, factors to convert weights of different forest products into weights of carbon will be needed. As well, a number of potentially complicated questions about the flow of raw timber into and out of a particular FMU will have to be answered. How much of the timber logged in a particular forest is processed within that particular district and how much is exported? How much of the wood run through a particular mill or mills whose production is being tracked comes from the forest management unit and how much comes from elsewhere? In some districts this may be relatively simple while in other areas these questions can be extremely difficult to answer.

8.2 Forest product decay rates

Forest products decay at various rates with carbon returning to the atmosphere. Figure 2 is reproduced from the report describing the assumptions that were used in the CFS Carbon Budget Model (Kurz *et al* 1992). It shows how different forest products have different life expectancies as well as different initial utilization rates.

The model assumes that pulp logs are converted to paper at an approximate average efficiency of less than 50%, and that roughly 50% of what is manufactured is lost in the first year. The model makes a variety of different assumptions about what happens to the carbon that leaves a particular product pool – some of it decomposes, some is used for bioenergy, some is recycled, and some ends up in landfills where 20% of what is dumped will retain its carbon indefinitely. Construction lumber, by contrast, has a much higher utilization efficiency as well as a longer life span and it takes 60 years for carbon losses to reach 50%.

Figure 2: Carbon retention curves for three forest product categories (construction lumber, other lumber, and pulp products) and for forest products discarded in landfills.



(Source: Kurz *et al* 1992)

The CBM-FPS factors in energy and other emissions resulting from active forest management including site preparation, planting, fertilization, thinning, logging, transport to the mill, processing, and transport to markets. To do this, it requires additional mill and sector data that quantify these activities – such data, although typically proprietary, are usually readily available. These emissions may have significant impacts on the net (total) carbon budgets of the local operation and at the national scale (Apps *et al* 1999).

9. Carbon Budget Modelling

Carbon budget models are useful and important for at least three distinct reasons:

1) they allow managers to make educated estimates about changes taking place in carbon pools that cannot be readily measured

directly, especially soil carbon pools;

2) they allow managers to compare different management scenarios to better understand the impact of management decisions on carbon storage in forests; and

3) they permit managers to project these values into the future.

There is an additional function that is drawing increasing attention in the climate change science community; namely projecting the possible or likely impacts of climate change on forests, forest health and forest carbon storage. In effect, these models can include scenarios that factor in large-scale changes beyond the control of the forest manager but that offer the manager some guidance as to possible adaptive strategies.

As always, a model is only as good as its input and the assumptions used to run it. Even if the inputs and assumptions are highly accurate, there is always the potential that unforseen events or changes will intercede to ensure that reality differs from the model. Even though the predictive capacity of a model may be weak (especially over the 100-years-plus time frames used) they are still very useful in assessing present management options.

There are many carbon budget models in use around the world. They each have their distinctive features, require different inputs to run them, use different assumptions to project carbon trends into the future, and provide different degrees of coverage in terms of what is included and what is not included.

This section provides a brief introduction to the Carbon Budget Model developed by the Canadian Forest Service. This is not to say that it is the only or necessarily the best model that exists, but it is discussed here because it is most likely to be accessible to forest managers across Canada. The model has been tested and applied in a number of different situations in Canada, and continues to undergo development for Canadian conditions.

9.1 The CFS Carbon Budget Model

The Carbon Budget modelling framework is described in detail in reports that are available from the Canadian Forest Service (e.g., Kurz *et al* 1992; Kurz and Apps 1999; Apps *et al* 1999). Briefly, "it estimates the C stocks contained in, and C flows among, forest biomass, soils, and product using data derived from forest inventories, ecosystem classifications, soil surveys, and other government and industry statistics. Annual forest growth and soil decomposition for representative stand types are simulated using empirical relationships. The effects of disturbances (principally wildfires, insect attacks, and harvesting) on forest age structure and on C releases to the atmosphere and forest floor are calculated on a 5-year cycle" (Price *et al* 1997).

In the most recent version, CFS's modelling framework has two components: Carbon Budget Model - Canadian Forest Sector 2 (CBM-CFS2 which accounts for changes in carbon pools in the forest ecosystem, i.e., NEP and NBP) and Carbon Budget Model - Forest Product Sector (CBM-FPS which accounts for changes in forest product carbon pools as well as energy use and energy production – bioenergy – within the forest sector). The CBM framework was initially developed and used in order to estimate forest sector carbon budgets for Canada as a whole. The model suggests that Canada's forest was a significant carbon sink from 1920 through to the early 1970s after which it became a net source, losing about 69 Mt C per year from 1985 to 1989 (Forest Sector Table 1998). This change was due mainly to the increased occurrences of wildfires and insect infestations beginning in the 1970s (Kurz and Apps 1999).

9.2 Local level applications of the CFS Carbon Budget Model

The CBM framework (CBM-CFS2 and CBM-FPS) was modified for application in the area covered by the **Foothills Model Forest** to use local, rather than national-scale, data. The modified model was used to simulate and compare the carbon storage over 250 years, from 1958 to 2238, according to a number of different scenarios, comparing different management scenarios (including an "unmanaged" scenario with no harvesting taking place) as well as testing the sensitivity of different assumptions used to run the model. The study demonstrates that managing a forest for wood production may lead to greater carbon storage than occurs in a natural forest

ecosystem if the management regime maintains a rotation period that is longer than the natural disturbance cycle. The model "base case" is based on a reported 50-year natural disturbance cycle in the Foothills area although more recent work (and the results of the model itself) suggest that this may be a significant underestimate (Price *et al* 1997).

The generic model has also been run in a number of **hypothetical forests** of 100,000 hectares each comprising representative landscapes of coastal and interior B.C. as well as the boreal forest in Ontario (Kurz *et al* 1998). In each case, a comparison was made between an "unmanaged forest" having a natural disturbance cycle between 80 and 400 years and a managed forest with a rotation age of 100-400 years. At risk of great simplification, the model found that where rotation age is the same as the natural disturbance cycle there is a tendency to see a moderate decline in carbon storage, principally because harvesting is directed preferentially at older stands while fire attacks all stands over a minimum threshold density. Where the rotation age is significantly shorter than the natural disturbance cycle (such as in coastal B.C. forests) the management regime can reduce carbon by as much as 42%.

9.3 A universally applicable carbon budget model

The work done above has demonstrated that the CFS Carbon Budget Model is able to be applied at the FMU level. The model itself, however, is not considered "user-friendly" and it cannot be applied in a particular forest situation without the active involvement of the model designers. With some relatively modest modifications, however, it could be made available in a "turn-key" version that could be easily used by others (Apps, pers. comm.).

10. Forests, Sustainable Forest Management and Climate Change

In the end, carbon budget modelling will only make real sense to forest managers if there is something that they can do about it; practical measures that forest managers can undertake that will help to address climate change. While many such measures do exist, it is also important to sound a few cautionary notes about general limitations on the role of forests in mitigating climate change.

Saturation: The overall value of forests in mitigating climate change is limited by the land available and the practical maximum of carbon that can be stored on the land (Schlamadinger & Marland 2000). This means that forest management activities offer at best a transition strategy towards genuine low-carbon futures; but there is a risk that too much attention on forest sinks may delay progress on more effective long-term actions.

Impermanence: Carbon storage in forests is potentially reversible due to future natural and anthropogenic activities, and this feature distinguishes them from activities that reduce fossil fuel use (IPCC SRLUCF 2000). For this reason, a tonne of sequestered carbon should not be considered equivalent to a tonne of avoided emissions.

The Kyoto Protocol (although its terms have yet to be defined) seems likely to provide credit for activities that provide a benefit during the first commitment period (2008-2012) but that may not necessarily retain this benefit over the long term. An example might be the establishment of fast-growing plantations which can sequester large amounts of carbon over the short term (several decades), but it is precisely the fast-growing characteristic of these plantations that makes them especially vulnerable to the issues of saturation and impermanence.

There are, however, a variety of forest management activities that offer genuine opportunities to improve the ability of forests and forest products to store carbon over the long term (>100 years). They include:

- Managing to a longer rotation age thereby increasing the overall percentage of high-volume forests on the land base;
- Selection cutting or commercial thinning; removing some forest products while leaving a high on-site volume;
- Protecting forests from fire, disease and insects;
- Establishing protected areas;
- Avoiding deforestation due to land conversion and road construction;
- Silvicultural activities that enhance and protect soil carbon;
- Establishing new forests, especially shelterbelts and other lands put into permanent forest cover;
- Promoting urban forests; and
- Changing the forest product mix to favour more long-lived products.

Other measures involve direct reductions in fossil fuel use such as promoting the use of trees for biomass energy and improving energy efficiency throughout the forest product chain, all the way from site establishment to logging, transportation, manufacture, marketing, consumption, recycling and disposal. Many of the forest management measures listed above provide timber revenues although they don't necessarily maximize the direct revenue per hectare. Most of them provide ancillary social, non-timber economic and/or biodiversity benefits. All of them are part of the "mix" of measures that forest managers might consider in moving towards sustainable forest management and they all have the potential to provide long-term environmental benefits through enhanced carbon storage.

11. Key Messages and Recommendations

To forest managers:

1. *Measuring carbon and carbon fluxes at the forest management unit level is not technically difficult and much can be done with data that is readily available to most forest managers.*
2. *Although initial measurements are likely to be somewhat imprecise and may not include all carbon pools, that does not invalidate their usefulness to forest managers who wish to incorporate an awareness of and sensitivity to climate change issues in their assessments, plans, monitoring and reporting.*
3. *Forest managers should report on the best available information, rather than waiting for "perfect" information to become available. Reporting now is the best way to generate the commitment to refine and improve upon initial estimates.*
4. *Several reports, available from the Canadian Forest Service's Northern Forest Centre, provide enough information to get started. "The carbon budget of the Canadian forest sector" (Kurz et al 1992, Information Report NOR-X-326) provides an excellent overview of the CFS Carbon Budget Model, while "A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils (Siltanen et al 1997) provides the necessary data on regional soil profiles. Other reports include, "A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector" (Kurz and Apps 1999) and "Carbon budget of the Canadian forest product sector" (Apps et al 1999. Carbon conversion factors are*

included in Figure 1 above (p.5). The other information needed to get started – volume of timber, growth yield curves, information about logging and natural disturbances – must be obtained locally.

5. *There are several forest management measures that can augment the ability of forests to store carbon, and that are consistent with sustainable forest management. Long-term approaches that increase the overall storage of carbon (measured as tonnes/hectare/year, averaged out over a century or more) are more valuable than approaches that focus primarily on increasing the rate of short-term sequestration.*

To the Model Forest Network:

6. *The Model Forest Network is well situated to play an important role in promoting the development of a universal carbon budget model that could be easily used with commonly available information by any forest manager. The Canadian Forest Service already has most of the elements needed to create a credible, easy-to-use universal model; and the support of and collaboration from the Model Forest Network could help to make this a priority.*

12. Acknowledgements

The author of this report gratefully acknowledges the support of the Canadian Model Forest Network's Local Level Indicators Strategic Advisory Committee which provided travel funding to assist in researching this report. David Price (Canadian Forest Service) was particularly helpful in explaining many aspects of the CFS Carbon Budget Model, as well as Mike Apps (Canadian Forest Service) and Werner Kurz (Essa Technologies Ltd). Taumey Mahendrappa (Canadian Forest Service) provided useful information about his research in the Maritimes, and Darrell Harris (Newfoundland Forest Service) outlined the use of forest inventories. Mike Apps, Ed Banfield, Jag Bhatti, Zhong Li and David Price reviewed a draft of this report and provided valuable suggestions although the author remains solely responsible for any errors it contains. And finally, the author wishes to thank Brian Bonnell (Canadian Forest Service) for his encouragement in undertaking this project and his assistance in completing it.

13. References

----- (1992) United Nations Framework Convention on Climate Change.

Apps, M.J., W.A. Kurz, S.J. Beukema, and J.S. Bhatti. 1999. Carbon budget of the Canadian forest product sector. *Environmental Science and Policy* 2: 25-41.

Apps, Michael J. and Marsden, Jenni (eds.) (2000) The Role of Boreal Forests and Forestry in the Global Carbon Budget (Abstracts). Canadian Forest Service, May 2000.

Binkley, C.S., M.J. Apps, R.K. Dixon, P. Kauppi, and L-O. Nilsson. 1998. Sequestering carbon in natural forests. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 27: S23-45.

Canadian Council of Forest Ministers (1997) Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management in Canada: Technical Report. Natural Resources Canada, 1996.

Forest Sector Table (1998) Foundation Paper: A Survey of the Forest Sector and Forest Sector Options. Natural Resources Canada, October 1998.

Forest Sector Table (1999) Options Report: Options for the Forest Sector to Contribute to Canada's National Implementation Strategy for the Kyoto Protocol. Natural Resources Canada, November 1999.

IPPC. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Organization for Economic Cooperation and Development and International Energy Agency.

IPCC (2000) Special Report on Land Use, Land-use Change and Forestry, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.

Kurz, W.A., Apps, M.J., Webb, T.M. and McNamee, P.J. (1992) The carbon budget of the Canadian forest sector: Phase I. Natural Resources Canada Information Report NOR-X-326, 1992.

Kurz, Werner A. And Apps, Michael J. (1999) A 70-Year Retrospective Analysis of Carbon Fluxes in the Canadian Forest Sector. *Ecological Applications* 9(2), pp 526-547.

Kurz, Werner A., Beukema, Sarah J. and Apps, Michael J. (1998) Carbon Budget Implications of the Transition from Natural to Managed Disturbance Regimes in Forest Landscapes. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 2, pp 405-421.

Kurz, Werner A. (1999) Assessing Options for Measurement of Verifiable Changes in Carbon Stocks from reforestation, Afforestation, and Deforestation and Other Potential Forestry Activities. Prepared by Essa Technologies Ltd. For the Sinks Table, June 22, 1999.

Mahendrappa, M.K. and Pitt, C.M. (2000) Organic Horizon Thickness: An Indicator of Sustainable Forest Management in the Maritime Provinces. Final Report on Criteria and Indicators Group 4 - Carbon Sequestration in the Forests. Submitted to the Fundy Model Forest. March 2000,.

Price, David T., Apps, Michael J., Kurz, Werner A., Wesbrook, Michael, and Curry, R. Sean (1994) A "Model Forest Model": Steps Toward Detailed Carbon Budget Assessments of Boreal Forest Ecosystems. *World Resources Review*, Vol. 6, No. 4, 1994, pp 461-476

Price, David T., Mair, Ralph M., Kurz, Werner A., and Apps, Michael J. (1996) Effects of forest management, harvesting and wood processing on ecosystem carbon dynamics: a boreal case study. *NATO ASI Series*, Vol I 40 pp 279-292

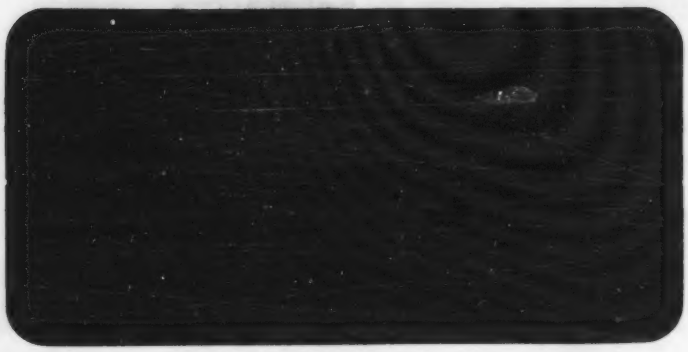
Price, D.T., Halliwell, D.H., Apps, M.J., Kurz, W.A., and Curry, S.R. (1997) Comprehensive assessment of carbon stocks and fluxes in a Boreal-Cordilleran forest management unit. *Canadian Journal of Forest Research* 27: pp 2005-2016

Price, David T., Apps, Michael J., and Kurz, Werner A. (1998) Past and Possible Future Carbon Dynamics of Canada's Boreal Forest Ecosystems. From G.M. Kohlmaier, M. Weber and R.A. Houghton (eds), Carbon Dioxide Mitigation in Forestry and Wood Industry, 1998, Springer, Berlin Heidelberg, pp 63-88.

Robinson, G.C., Peterson, E.B., Smith, S.M. and Nagle, G.S. (1999) Estimating the carbon sequestration associated with reforestation in western Canada. Submitted by Nawitka Renewable Resource Consultants to the Forest and Sinks Tables, June 11 1999.

Schlamadinger, B. and Marland, G. (2000) Land Use and Global Climate Change: Forests, Land Management, and the Kyoto Protocol. Pew Center on Global Climate Change, June 2000.

Siltanen, R.M., Apps, M.J., Zoltai, S.C., Mair, R.M. and Strong, W.L. (1997) A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils. Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 1997.



THE CANADIAN MODEL FOREST NETWORK

MODEL FOREST NETWORK
RÉSEAU DE FORÊTS MODÈLES

LE RÉSEAU CANADIEN DE FORÊTS MODÈLES

Natural Resources Canada
Canadian Forest Service
Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts

Canada

PROGRAMME DE FORÊTS MODÈLES DU CANADA

La comptabilité du bilan du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier : aperçu des enjeux et des méthodes

Juillet 2000

Le Service canadien des forêts :

Mission: «Promouvoir le développement durable des forêts canadiennes et la compétitivité du secteur canadien des forêts pour garantir le mieux-être des Canadiens d'aujourd'hui et de demain».

Le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada est également partenaire principal de chacune des onze forêts modèles, et il fournit l'essentiel du financement et de l'appui administratif au programme des forêts modèles du Canada.

Le Canada a pris les devants dans la recherche de moyens pour veiller à la durabilité et à l'amélioration de nos forêts. Le gouvernement canadien, par l'entremise du Service canadien des forêts, a mis en place le Réseau des forêts modèles en 1992. Il s'agit d'un système reliant 11 sites de recherche canadiens et d'autres sites internationaux voués à « former des partenariats au niveau local, national et international dans le but de susciter de nouvelles idées et de trouver des solutions pratiques en matière d'aménagement forestier durable ». Ce système a rapproché des centaines de partenaires provenant notamment du milieu universitaire, de l'industrie, du gouvernement, des collectivités, des peuples autochtones, du public et d'autres milieux intéressés.

Site web: **www.NRCan.gc.ca**

Qu'est-ce qu'une forêt modèle?

Une forêt modèle est un endroit où les meilleures pratiques d'aménagement forestier durable sont élaborées, testées, puis partagées avec le reste du pays. Chaque forêt modèle est gérée par un organisme à but non lucratif et, à l'exception d'un personnel administratif restreint, toutes les personnes participant aux travaux de la forêt modèle offrent gracieusement leur temps et leur savoir et, habituellement, fournissent même un appui financier.

Au coeur de chaque forêt modèle, on retrouve un groupe de partenaires qui ont des points de vue différents sur la dynamique sociale, environnementale et économique de leur forêt. Ces différences sont nécessaires pour en arriver à des décisions justes et informées sur la façon d'aménager la forêt. Le vrai «modèle» dans ces forêts est la façon dont les divers partenaires - compagnies forestières, communautés autochtones, producteurs de sirop d'érable, propriétaires de boisés, parcs, écologistes, universités, organismes gouvernementaux, groupes récréatifs, associations communautaires, chasseurs, trappeurs - ont intégré leurs intérêts personnels pour se donner un but commun, celui d'élaborer des approches pour l'aménagement durable de la forêt sans sacrifier les intérêts des autres.

Même si la forêt modèle n'a pas de droits sur les terres utilisées pour ses essais, ceux qui en ont doivent y participer. En prenant part dès le début à l'élaboration des nouvelles approches et solutions pratiques, les responsables de l'aménagement forestier adoptent progressivement les suggestions de la forêt modèle.

Site web du Réseau des forêts modèles: **www.foretmodele.net**

Print: Numéro de catalogue Fo42-312/2000F
ISBN 0-662-84930-2

PDF: Numéro de catalogue Fo42-312-2000F-IN
ISBN 0-662-84931-0

Exemplaires disponibles gratuitement auprès de :

Programme de forêts modèles du Canada
Ressources naturelles Canada
Service canadien du Canada
580, rue Booth
Ottawa (Ontario) K1A 0E4

Téléphone : (613) 992-5874
Téléc. : (613) 992-5390
Site Internet : **www.foretmodele.net**

This publication is also issued in English under the title:
Carbon Budget Accounting at the Forest Management Unit Level: An Overview of Issues and Methods

La comptabilité du bilan du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier :

aperçu des enjeux et des méthodes

Le présent rapport a été préparé comme document d'information pour le Réseau canadien de forêts modèles par Martin von Mirbach, consultant. Il ne s'agit pas d'une publication officielle du Service canadien des forêts ou du Programme de forêts modèles du Canada. Toute opinion qu'il exprime ne reflète pas nécessairement les points de vue du Service canadien des forêts ou du Réseau canadien de forêts modèles.

Préparé pour :
le Réseau canadien de forêts modèles

Par :
Martin von Mirbach
20 Elford Avenue
Corner Brook (T.-N.) A2H 2N1
Tél. : (709) 634-0371
Courriel : alterego119@hotmail.com

Juin 2000

Résumé

Le présent rapport a été préparé après qu'on eut décelé le besoin de fournir des directives aux aménagistes forestiers qui s'efforcent de rendre compte du bilan du carbone à l'échelle de l'unité d'aménagement forestier (UAF). Sa préparation a bénéficié du soutien du Comité consultatif stratégique sur les indicateurs locaux du Réseau canadien de forêts modèles.

Un bref tour d'horizon des recherches sur le bilan du carbone dans l'ensemble du Réseau de forêts modèles révèle que seule la Forêt modèle de Foothills a déployé de gros efforts pour rendre compte des flux du carbone dans son territoire. De nombreuses forêts modèles ont jugé que la question devait être abordée à l'échelle provinciale ou nationale plutôt qu'à celle de l'UAF. Le présent rapport adopte un point de vue différent et soutient que le bilan du carbone préliminaire au niveau de l'UAF ne présente pas, dans la plupart des cas, de défis insurmontables, sans compter que si l'on veut que la comptabilité du carbone influence vraiment les décisions d'aménagement, il faut alors la ramener à l'échelle de l'unité d'aménagement forestier.

Le carbone se trouve dans la biomasse vivante, dans la matière organique morte ou en décomposition, dans la matière organique du sol, dans les sols minéraux et les produits forestiers. Ces « réservoirs » de carbone ne sont pas stables et évoluent de manière différente, du carbone venant s'y ajouter en vertu de divers processus naturels et anthropiques et en s'échapant à des rythmes variables soit pour entrer dans un autre réservoir soit pour être réémis dans l'atmosphère.

Le bilan du carbone peut être ventilé en trois tâches distinctes :

- obtenir une mesure de base de la quantité de carbone qui se trouve dans une forêt donnée à un moment donné;
- mesurer l'évolution de ce réservoir dans le temps;
- évaluer l'incidence probable de diverses activités d'aménagement sur les variations futures du bilan du carbone.

Chacune de ces tâches est analysée tour à tour, fournissant les données dont ont besoin les aménagistes forestiers pour mettre ces mesures en pratique dans leur unité d'aménagement forestier particulière. Ces méthodes peuvent être utilisées de trois façons différentes pour suivre les variations dans le temps qui surviennent dans les stocks de carbone: en comparant les mesures de base successives; en suivant les changements survenus après une mesure de base; ou en mesurant les variations proprement dites, sans référence à une mesure de base. Les avantages et les inconvénients de chaque méthode sont analysés brièvement.

Le présent rapport se concentre sur la façon d'utiliser les inventaires existants pour rendre compte des stocks et des flux de carbone. Le recours à des mesures directes et à la télédétection pourrait jouer un rôle important dans le bilan du carbone, même si ce rapport n'en traite pas, car pour l'instant, leur application fructueuse à l'estimation du bilan du carbone dépend encore de solides estimations de base tirées des évaluations du bilan du carbone reposant sur les inventaires.

La difficulté qu'il y a à consigner les changements qui surviennent dans le réservoir des produits forestiers est analysée indépendamment de celle qu'il y a à consigner les changements dans la forêt.

Le Service canadien des forêts a conçu un certain nombre d'instruments pour aider à modéliser le bilan du carbone, notamment un modèle destiné au secteur forestier canadien et un autre au secteur des produits

forestiers. Ces modèles sont brièvement décrits, ainsi que certaines initiatives visant à les appliquer au niveau de l'unité d'aménagement forestier.

Le rapport se termine par une liste de certaines activités qui pourraient contribuer à stocker du carbone dans les forêts.

Principaux messages et recommandations

À l'intention des aménagistes forestiers :

1. La mesure du carbone et des flux du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier n'est pas une tâche difficile sur le plan technique, et elle peut se faire avec des données facilement accessibles à la plupart des aménagistes forestiers.

2. Même si les mesures préliminaires risquent d'être légèrement imprécises et qu'elles peuvent ne pas porter sur tous les réservoirs de carbone, cela n'affecte nullement leur utilité pour les aménagistes forestiers qui souhaitent intégrer une certaine connaissance des problèmes du changement climatique dans leurs évaluations, leurs plans, leurs activités de surveillance et leurs rapports.

3. Les aménagistes forestiers doivent rendre compte des meilleures données disponibles au lieu d'attendre que des données « parfaites » ne le deviennent. Faire rapport immédiatement constitue la meilleure façon d'obtenir l'engagement de peaufiner et d'améliorer les estimations préliminaires.

4. Plusieurs rapports, que l'on peut se procurer auprès du Centre de foresterie du Nord du Service canadien des forêts, contiennent suffisamment d'informations pour commencer. « Le bilan du carbone du secteur forestier canadien » (Kurz *et al.*, 1992, Rapport d'information NOR-X-326) donne un excellent aperçu du modèle de bilan du carbone du SCF, tandis que « A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra minerals soils » (Siltanen *et al.*, 1997) fournit les données nécessaires sur les profils pédologiques régionaux. Au nombre des autres rapports, il faut citer : « Une analyse rétrospective sur 70 ans des flux du carbone dans le secteur forestier canadien » (Kurz et Apps, 1999) et « Le bilan du carbone du secteur canadien des produits forestiers » (Apps *et al.*, 1999). On trouvera les facteurs de conversion du carbone à la figure 1. Les autres données dont on a besoin pour commencer (volume de bois, courbes d'accroissement en volume, données sur l'exploitation et les perturbations naturelles) sont disponibles localement.

5. Il existe plusieurs mesures de l'aménagement des forêts qui permettent d'accroître la capacité des forêts à stocker du carbone et qui concordent avec l'aménagement forestier durable. Les méthodes à long terme qui ont pour effet d'accroître le stockage global du carbone (mesuré en tonnes/hectare/an et établi en moyenne sur au moins un siècle) présentent plus d'intérêt que les méthodes qui se concentrent essentiellement sur l'accroissement du taux de séquestration à court terme.

À l'intention du Réseau de forêts modèles :

6. Le Réseau de forêts modèles est en fort bonne posture pour jouer un rôle de premier plan dans l'élaboration d'un modèle universel du bilan du carbone qui pourra facilement être utilisé par n'importe quel aménagiste forestier moyennant des données facilement disponibles. Le Service canadien des forêts possède déjà la plupart des éléments nécessaires à la création d'un modèle universel crédible et facile à utiliser, et le soutien et le concours du Réseau de forêts modèles pourrait contribuer à en faire une priorité.

Table des matières

Résumé i

Principaux messages et recommandations iii

1. Introduction 1
1.1 Contexte 1
1.2 But 2

2. Principaux concepts 2

3. Tâches 4

4. Méthodes 4

5. Forêts modèles et comptabilisation du carbone 5

6. Prise de mesures de base 6
6.1 Carbone dans la biomasse vivante 6
6.2 Carbone du sol 7

7. Estimation des flux du carbone 8
7.1 Comparaison des mesures de base successives 8
7.2 Mesure de base additionnée des variations estimatives des stocks 8
7.3 Mesure du flux seul (production nette du biome) 9
7.4 Conclusion 9

8. Carbone des produits forestiers 10
8.1 Calcul des contributions initiales au réservoir de carbone des produits forestiers 10
8.2 Rythmes de décomposition des produits forestiers 10

9. Modélisation du bilan du carbone 11
9.1 Modèle de bilan du carbone du SCF 12
9.2 Applications locales du Modèle de bilan du carbone du SCF 12
9.3 Modèle de bilan du carbone d'application universelle 13

10. Forêts, aménagement durable des forêts et changement climatique 13

11. Principaux messages et recommandations 14

12. Remerciements 15

13. Bibliographie 16

1. Introduction

1.1 Contexte

Il est aujourd'hui couramment admis que le climat planétaire subit l'influence de l'activité humaine qui entraîne l'émission de certains gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les forêts et leur aménagement ont un rapport avec le dossier du changement climatique sous trois grands rapports :

a) l'industrie forestière et ses infrastructures connexes émettent d'importantes quantités de gaz à effet de serre par leurs activités en amont (préparation des sites, sylviculture, exploitation, transport jusqu'aux scieries), leurs processus de fabrication et leurs activités en aval (transport jusqu'aux marchés et émissions résultant de la décomposition et du recyclage). Des mesures entraînant une réduction des émissions de gaz à effet de serre contribueront à atténuer les changements climatiques;

b) les forêts sont d'importants réservoirs de carbone. Les composés du carbone comme le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et certaines molécules organiques sont les principaux gaz à effet de serre. Lorsque le carbone est stocké dans les forêts (dans la biomasse vivante, la biomasse morte ou les sols) ou dans les produits forestiers, il n'est pas dans l'atmosphère. La destruction des forêts à l'échelle planétaire est un facteur qui contribue beaucoup aux changements climatiques. En revanche, on a déterminé que la possibilité d'accroître le stockage du carbone dans les forêts (c.-à-d. en créant des « puits ») est un moyen possible d'atténuer les changements climatiques à court terme;

c) les forêts sont vulnérables aux changements climatiques et y réagissent de différentes façons qui ne sont pas encore prévisibles de manière fiable. Il se peut qu'un allongement de la saison de croissance se traduise par un plus fort accroissement, lequel peut être partiellement ou entièrement neutralisé par une respiration accrue. Il se peut que le déplacement des zones climatiques permette aux forêts de s'établir dans les régions actuellement déboisées (même si dans beaucoup de ces régions, les sols sont incapables de porter des forêts). Par contre, il se peut que le déplacement des zones climatiques accroisse la destruction des forêts ou même la désertification de certaines régions de la planète et que les incidences prévues comme la sécheresse et les catastrophes météorologiques augmentent la fréquence et l'ampleur des perturbations comme les incendies, les flambées d'insectes et les dégâts causés par les tempêtes.

Le présent rapport s'intéresse avant tout au deuxième de ces trois points, sans vouloir d'aucune façon restreindre l'importance des deux autres.

L'importance du « bilan du carbone » du secteur forestier canadien est reconnue dans les Critères et indicateurs de l'aménagement durable des forêts qui ont été conçus par le Conseil canadien des ministres des forêts. Le critère n° 4 reconnaît l'importance des contributions des écosystèmes forestiers aux cycles écologiques planétaires, et neuf des indicateurs traitent expressément des données dont on a besoin pour déterminer le bilan du carbone du secteur forestier.

Plusieurs facteurs distincts expliquent pourquoi il est important de mesurer le bilan du carbone du secteur forestier et d'en rendre compte. Le bilan du carbone permet de savoir si et comment les forêts accentuent ou atténuent les changements climatiques. Il permet de mieux comprendre les façons diverses et complexes dont les forêts réagissent au climat et l'influencent. Enfin, et surtout, le bilan permet aux aménagistes forestiers de tenir compte du stockage du carbone lorsqu'ils doivent évaluer différentes options d'aménagement.

Pour que cette dernière possibilité puisse se réaliser toutefois, il faut à tout prix que la comptabilisation du carbone puisse être ramenée de l'échelle nationale et planétaire à l'échelle qui présente le plus d'intérêt pour un aménagiste forestier, soit l'unité d'aménagement forestier. Or, cela n'a pas encore été fait de manière systématique et universelle, d'où la possibilité qui s'offre au Réseau canadien de forêts modèles de faire preuve de leadership à cet égard.

1.2 But

Le but de ce rapport est de donner un aperçu des instruments existants ou en cours de conception qui permettent aux aménagistes forestiers de suivre les variations des stocks de carbone dans les forêts au niveau local. Ce rapport analyse également l'applicabilité du modèle de bilan de carbone du Service canadien des forêts au niveau de l'unité d'aménagement forestier, afin de permettre aux aménagistes forestiers de déterminer l'incidence que les décisions d'aménagement risquent d'avoir sur le stockage du carbone au niveau local.

2. Principaux concepts

Les définitions et les éclaircissements donnés dans cette section ont pour but de présenter quelques concepts clés, surtout dans les domaines où règne souvent un certain état de confusion. Aucune des définitions ne se veut une définition technique rigoureuse.

Carbone, CO_2 et CH_4 : lorsqu'on mesure le carbone dans les arbres ou les sols, on en exprime généralement le volume en unités de carbone. Lorsque le carbone qui se trouve dans la matière organique se décompose et pénètre dans l'atmosphère, il le fait essentiellement sous forme de dioxyde de carbone, ce qui explique que les émissions de gaz à effet de serre soient exprimées en tonnes de CO_2. Une tonne de carbone qu'on laisse se décomposer et retourner dans l'atmosphère produit 3,667 tonnes de CO_2. De même, la création d'un nouveau réservoir d'une tonne de carbone équivaut à une diminution de 3,667 tonnes de CO_2. Les conditions anaérobies (sans oxygène) comme celles que l'on trouve dans les forêts des terres basses ou les tourbières entraînent la production de méthane (CH_4) qui peut grandement contribuer au flux net des gaz à effet de serre. Le méthane est un gaz à effet de serre plus actif que le CO_2 (si l'on considère son incidence sur l'atmosphère, une tonne de CH_4 équivaut à environ 20 tonnes de CO_2).

Réservoirs de carbone forestier : on trouve du carbone dans la biomasse vivante, la matière organique morte ou en décomposition, la matière organique du sol, les sols minéraux et les produits forestiers. Ces catégories sont souvent regroupées en plusieurs grappes, mais différentes méthodes de comptabilisation donnent des résultats différents. Certaines font la distinction entre le carbone aérien et le carbone souterrain alors que d'autres font la distinction entre la biomasse et le carbone du sol. Il ne semble pas y avoir de consensus parmi les scientifiques sur le moment précis où la matière ligneuse en décomposition passe de l'état de biomasse à celui de sol. Cela n'a sans doute guère d'importance pour un aménagiste forestier, même s'il vaut la peine de signaler que différents modèles de bilan du carbone utilisent différentes règles pour déterminer la façon dont le carbone provenant de la biomasse pénètre dans le réservoir pédologique.

On trouvera ci-après une analyse des différents niveaux de précision des systèmes de comptabilisation du carbone.

Production primaire nette : quantité totale de photosynthèse diminuée de la quantité totale de respiration des végétaux. La photosynthèse qui a pour effet de séquestrer du carbone atteint généralement son paroxysme durant la journée et durant l'été, même si une partie du carbone séquestré est réémis par la respiration des végétaux la nuit et l'hiver.

Production nette d'un écosystème : production primaire nette diminuée des pertes attribuables à la décomposition à mesure que la couche de feuilles mortes, les arbres morts, les racines et les branches tombées pourrissent et que l'arbre lui-même succombe à la pourriture.

Production nette du biome : production nette de l'écosystème diminuée des pertes attribuables aux perturbations, notamment aux perturbations naturelles comme les incendies, les insectes, la maladie et le chablis, de même qu'aux perturbations anthropique comme l'exploitation forestière et le déboisement.

Comptabilisation du secteur forestier : la

comptabilisation vraiment complète du carbone dans le secteur forestier représente sans doute un idéal abstrait. La comptabilisation complète du secteur majorera la production nette du biome, notamment le carbone qui vient s'ajouter au réservoir de carbone des produits forestiers de même que toute unité résultant de l'utilisation d'énergie verte en remplacement des combustibles fossiles. Il convient de soustraire de ce total le rythme de décomposition des produits forestiers de même que les apports énergétiques qui se font tout au long du cycle d'aménagement d'une forêt (voir point (a) à la rubrique 1.1 ci-dessus).

En général, un bilan du carbone suffisant pour un territoire forestier donné comporte à tout le moins la production nette du biome. On s'efforce d'y inclure les éléments d'un système de comptabilisation du secteur forestier, mais dans ce cas, il faut adopter un mode de comptabilisation équilibré au sujet des sources de carbone ainsi que des puits.

On présume souvent que l'objectif primordial de la comptabilisation du carbone est d'appuyer les objectifs des conventions internationales sur les changements climatiques et les rapports qui vont de pair. Cela n'est pas forcément le cas, mais pour éviter toute confusion, il importe de faire la différence entre les prescriptions radicalement différentes des deux principaux instruments juridiques qui ont un rapport avec les changements climatiques.

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques : les négociations sur la Convention-cadre ont abouti au Sommet de la Terre en 1992 et celle-ci a depuis lors été ratifiée par un nombre suffisant de pays (dont le Canada) pour entrer en vigueur. Les pays signataires ont pris l'engagement d'assurer la conservation et l'amélioration des puits et des réservoirs et d'établir et de publier des inventaires nationaux des émissions de gaz à effet de serre, notamment des activités anthropiques qui ont trait aux puits. La production de rapports est obligatoire et doit se conformer à certaines lignes directrices assez flexibles (GIEC, 1997) en ce qui concerne les changements d'affectation des terres et la foresterie. Il faut signaler que la Convention-cadre ne comporte aucune cible contraignante de réduction des émissions.

Protocole de Kyoto : il s'agit d'un accord auxiliaire de la Convention-cadre qui a été approuvé en 1997 et signé mais pas encore ratifié par le Canada, et qui n'est donc pas encore en vigueur. Il établit des cibles auxquelles certains pays conviennent de se conformer au sujet de leurs émissions de gaz à effet de serre. Les pays doivent inclure dans leurs inventaires les variations des stocks de carbone entre 2008 et 2012 attribuables aux activités de boisement, de reboisement ou de déboisement survenues depuis 1990 (autrement dit, une infime proportion de la superficie de la forêt toute entière). Une disposition de cet accord prévoit que d'autres activités d'aménagement du territoire peuvent être incluses dans les inventaires nationaux. Les règles relatives à ces autres activités, de même que les définitions précises des termes boisement, reboisement et déboisement, ne seront pas connues avant novembre 2000 au plus tôt. Tant que ces négociations ne seront pas terminées, on ne peut pas être certain des activités forestières qui sont visées par le Protocole de Kyoto[1]. Il importe de signaler que les méthodes de comptabilisation analysées dans ce rapport n'ont pas pour but de traiter des mesures qu'il faut prendre en vertu du Protocole de Kyoto.

Que signifie tout cela pour les aménagistes forestiers? Ni l'une ni l'autre de ces conventions internationales n'a un rapport précis avec ce qui est décrit dans ce rapport. La Convention-cadre stipule seulement qu'il faut établir des rapports à l'échelle nationale, tandis que le Protocole de Kyoto est encore tellement loin de sa forme finale qu'il est impossible de dire ce que doivent comporter les

[1] Par exemple, on estime que l'incidence nette des activités de reboisement et de déboisement au Canada selon des scénarios de « maintien du statu quo » variera d'une source de Co_2 équivalant à 21 Mt/an à un puits de Co_2 équivalant à 10 Mt/an (Table du secteur forestier, 1998). Cet écart colossal repose entièrement sur différentes opinions sur ce qui a des chances d'être inclus dans le Protocole de Kyoto.

règles de comptabilisation. On peut néanmoins affirmer sans risque de se tromper que le mode de comptabilisation du carbone analysé dans ce rapport doit se faire au niveau local. Si le Canada veut promouvoir la conservation et l'amélioration des puits et des réservoirs forestiers, les activités sur le terrain à l'appui de cet objectif doivent être pour la plupart menées par les aménagistes locaux. Ceux-ci ont donc besoin de solides données qui leur indiqueront l'incidence de leurs activités d'aménagement. Un bilan du carbone précis est un instrument indispensable à cet égard.

Une dernière mise en garde s'impose, à savoir la différence qu'il faut faire entre un puits et un réservoir.

Puits et réservoirs : un puits est une activité qui soustrait (ou « séquestre ») du carbone à l'atmosphère et il est le contraire d'une « source ». Un réservoir en revanche, est la réserve effective de carbone proprement dit, stocké sous une forme qui le soustrait à l'atmosphère pendant une courte ou une longue période. La distinction entre ces deux termes revêt une importance cruciale. Une jeune forêt en pleine croissance, par exemple, est un bon puits de carbone car elle séquestre du carbone à une cadence élevée. Une vieille forêt en revanche constitue généralement un meilleur réservoir de carbone, car elle stocke un plus grand volume de carbone et qu'elle rend ce service même si sa croissance s'est stabilisée. Il en résulte qu'une vieille forêt peut être un bon réservoir forestier et un puits médiocre (ou même une source légère). Pour déterminer si une forêt est un puits ou non, on peut mesurer la quantité de carbone qui entre dans la forêt par rapport à celle qui en sort (GIEC, 2000). Pour déterminer si une forêt est un réservoir, on peut calculer le nombre de tonnes de carbone par hectare par an, établi en moyenne sur une échelle temporelle au moins aussi longue qu'une révolution complète. Les méthodes de comptabilisation du carbone décrites dans ce rapport peuvent servir aux deux calculs. Il faut signaler en passant que le Protocole de Kyoto reconnaît le rôle des puits forestiers alors que la Convention-cadre attache plus d'importance aux forêts en tant que réservoirs de carbone. Comme instruments politiques donc, les deux conventions risquent d'agir à contre- courant. Si l'aménagement des forêts doit tenir suffisamment compte des échelles à long terme (› 100 ans) adaptées aux cycles des écosystèmes forestiers tout en contribuant à atténuer les changements climatiques, le rôle des forêts comme réservoirs de carbone à long terme revêt donc beaucoup plus d'importance que leur rôle de puits qui est d'une durée relativement plus courte.

3. Tâches

Essentiellement, trois tâches entrent en jeu dans la budgétisation du carbone.

1. Obtenir une mesure de base du volume de carbone dans une région donnée à un moment donné.

2. Mesurer les variations de cette quantité dans le temps.

3. Évaluer l'incidence probable de diverses activités d'aménagement sur la capacité de la forêt à tenir lieu de réservoir de carbone et intégrer ce savoir dans le processus décisionnel.

Chacune de ces tâches est analysée respectivement dans les sections 6, 7 et 8 de ce rapport.

4. Méthodes

On mène actuellement un volume colossal d'activités scientifiques diversifiées au sujet des forêts et de la comptabilisation du carbone, et diverses méthodes sont utilisées pour les mesures, la modélisation et la comptabilisation. De plus, ces méthodes s'appliquent à des échelles radicalement différentes, ce qui est un facteur important lorsqu'on tient compte de la comptabilisation du bilan du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier.

Mesure directe : il s'agit du niveau maximum de

précision qui comporte des recherches sur la photosynthèse des végétaux, les rythmes de décomposition, les profils pédologiques, etc. Les données provenant de ces études à petite échelle sont toutefois difficiles à appliquer aux estimations du carbone dans toute l'unité d'aménagement forestier, ce qui explique que cette méthode ne soit pas abordée dans ce rapport. La mesure directe vise plus à quantifier les puits de carbone et l'influence qu'exercent sur eux les conditions environnementales qu'à estimer les réservoirs de carbone.

Établissement d'inventaires : cela désigne l'utilisation des inventaires forestiers et d'autres données sur les puits (production nette de l'écosystème, carbone stocké dans les produits forestiers) calculés d'un côté du grand livre et les sources (perturbations, exploitation, décomposition des produits forestiers, autres émissions) calculées de l'autre. C'est la méthode la plus couramment utilisée dans l'établissement des bilans du carbone forestier à des échelles qui dépassent le niveau du peuplement. Bien sûr, la précision de cette méthode dépend de l'exhaustivité et de l'exactitude des données. Par ailleurs, même s'il existe des profils pédologiques pour la majeure partie du Canada qui font état des estimations de la teneur en carbone, d'autres méthodes sont nécessaires pour évaluer les incidences possibles des perturbations et de l'aménagement forestier sur les réservoirs de carbone du sol.

Télédétection : on utilise de plus en plus la télédétection pour obtenir des estimations globales des flux du carbone dans les forêts. La télédétection autorise une plus grande uniformité lorsqu'on essaie de regrouper les données provenant de plusieurs inventaires, en plus de combler les lacunes des inventaires. Toutefois, la télédétection n'offre pas encore un niveau de précision acceptable ou sécuritaire. En général, la télédétection sert essentiellement à évaluer globalement l'incidence que les changements climatiques risquent d'avoir sur les forêts dans le monde entier en suivant les principales perturbations, les variations de la saison de croissance et la production primaire nette. Au nombre des applications futures possibles, mentionnons l'utilisation des données de télédétection pour construire des modèles à l'échelle, à partir de la mesure directe des flux du carbone prise dans un nombre relativement restreint de stations.

Ce rapport repose sur l'idée que la méthode privilégiée de comptabilisation du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier réside sans doute dans l'établissement d'inventaires avec prise de mesures directes pour peaufiner l'exactitude des hypothèses et le recours à la télédétection pour aider à combler les lacunes. Les aménagistes qui ne tiennent pas un inventaire forestier précis obtiendront difficilement de bonnes mesures de base, ce qui ne les empêchera pas forcément d'enregistrer les flux de carbone.

Il existe d'autres méthodes de mesure que celles qui sont décrites dans ce rapport. Il faut mentionner en particulier les mesures directes du flux moyennant l'utilisation de tours de flux, de chambres et d'aéronefs qui servent à la vérification des modèles. Le chapitre 2 du rapport spécial du GIEC sur l'affectation des terres, les variations d'affectation des terres et la foresterie contient un résumé concis des diverses méthodes et de leurs limites.

5. Forêts modèles et comptabilisation du carbone

Un tour d'horizon rapide du Réseau de forêts modèles révèle qu'on y mène relativement peu d'activités sur la budgétisation du carbone. Les quelques éléments qui suivent proviennent des recherches menées en vue d'établir un document de référence qui résume les réalisations des forêts modèles dans l'utilisation des indicateurs locaux, et d'autres sources.

La **Forêt modèle de Foothills** est sans conteste celle qui a mené le plus de recherches à ce sujet puisqu'elle a effectivement établi un modèle de bilan du carbone la concernant. Les résultats sont analysés brièvement à la section 8 ci-après.

Le modèle utilisé a été conçu et appliqué par le Service canadien des forêts. Ce projet de recherche a servi à démontrer qu'il est possible de mener de telles analyses à l'échelle opérationnelle. Toutefois, le modèle n'est pas encore suffisamment convivial pour pouvoir être utilisé sans aide par les aménagistes forestiers.

La **Forêt modèle de Fundy** a six indicateurs dans la section de la matrice générale du Réseau de forêts modèles intitulée « Contributions au bilan du carbon global ». Toutefois, cette Forêt modèle estime que ces indicateurs ne sont pas fonctionnels au niveau local et qu'il vaut mieux en laisser le soin aux organismes provinciaux et fédéraux. La Forêt modèle de Fundy a proposé une collaboration avec la Forêt modèle de Foothills afin de vérifier et de peaufiner les hypothèses nationales sur le carbone du sol, mais elle n'a pas reçu un appui suffisant pour donner suite à cette proposition. Le problème semble dû au fait que le projet se situait à l'échelle « micro » alors que l'équipe de modélisation du bilan du carbone du SCF s'intéresse davantage à l'échelle « macro ».

La **Forêt modèle de l'ouest de Terre-Neuve** a deux indicateurs dans la section de la matrice générale des indicateurs du Réseau de forêts modèles intitulée « Contributions au bilan du carbone global ». Elle n'a cependant pas recueilli de données sur ces indicateurs. Elle est partie prenante à une proposition visant à étudier la possibilité de recueillir des données d'inventaire au moyen d'une méthode d'échantillonnage en grille de manière à respecter les prescriptions provinciales en matière de rapports tout en recueillant des informations utilisables à l'échelle de l'UAF. Elle a également manifesté de l'intérêt pour les résultats d'une étude nationale menée par le SCF dont le but est d'évaluer le potentiel offert par la télédétection pour mesurer la biomasse. Ces deux études nécessiteront un volume considérable de tests et d'évaluations avant de donner des résultats susceptibles d'être appliqués à l'échelle locale.

La **Forêt modèle du lac Abitibi** a inscrit trois indicateurs dans la section de la matrice générale des indicateurs du Réseau de forêts modèles intitulée « Contributions au bilan du carbone global », mais n'a pas encore procédé à la collecte de données.

La **Forêt modèle de l'est de l'Ontario** est la première (et la seule) forêt modèle à rendre compte de son état actuel selon un vaste éventail d'indicateurs, même si son *Rapport sur l'état de la forêt* ne comporte aucune mesure du volume de carbone dans la forêt.

Aucune autre forêt modèle n'a inscrit d'indicateurs dans la catégorie « Contributions au bilan du carbone global ».

6. Prise de mesures de base

6.1 Carbone dans la biomasse vivante

Cette mesure est facile à prendre sous réserve que le volume de bois sur pied dans la forêt à un moment donné soit connu en vertu d'un inventaire forestier actualisé. Il faut alors convertir le volume de bois en un volume total de biomasse avant de le convertir en une masse de carbone ou CO_2. Les coefficients de conversion indiqués à la figure 1 reposent sur ceux qui figurent dans le *Manuel de référence des lignes directrices sur l'inventaire des gaz à effet de serre* du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat et qui ont été modifiés par Environnement Canada selon les données canadiennes. Malgré ces modifications, les coefficients de conversion ne sont en général que des approximations ou des moyennes. Il se peut qu'il existe des tableaux de conversion plus précis, axés sur certaines essences, classes d'âge et types de sol, lesquels devraient influencer la proportion de biomasse souterraine par rapport à la biomasse aérienne. Il n'en reste pas moins que ces chiffres peuvent servir de point de départ et qu'ils sont jugés acceptables selon les prescriptions relatives aux rapports nationaux et internationaux.

Figure 1 : Coefficients de conversion

1. Pour modifier le volume marchand afin d'y inclure le volume non marchand comme l'écorce, les les houppiers et les branchages :
   multiplier le volume marchand par 1,454.
2. Pour estimer le volume souterrain :
   multiplier le volume marchand par 0,396.
3. Pour obtenir le volume total de bois :
   additionner 1 et 2.
4. Pour convertir le volume de bois (m^3) en tonnes de biomasse de matière sèche :
   multiplier le volume de bois par 0,43.
5. Pour convertir la biomasse de matière sèche en carbone :
   multiplier la biomasse de matière sèche par 0,5.
6. Pour convertir le carbone en équivalent-CO_2 :
   multiplier le carbone par 3,6667.

6.2 Carbone du sol

On trouve des données sur le carbone du sol des stations de tout le Canada dans une étude intitulée *Base de données sur le profil pédologique et le carbone organique dans les sols minéraux de la forêt et de la toundra canadiennes* (Siltanen *et al.*, 1997). Ces données reposent sur les profils établis au sujet de 1 462 stations réparties à travers le Canada. Les résultats sont généralisés au tableau 1 ci-après, qui a été extrait de ce rapport. L'emplacement des stations figure sur une carte d'accompagnement et le rapport est fourni avec une disquette qui contient des renseignements détaillés sur chacune de ces stations.

Il importe de signaler que ces profils pédologiques ne prédisent pas forcément avec exactitude le volume de carbone présent dans une station. Ils représentent toutefois les meilleures données dont on dispose sur le Canada en général et passent pour être suffisamment précis pour permettre de budgétiser le carbone, le modéliser et rédiger des rapports, même s'il est indéniable qu'on pourrait facilement les améliorer en utilisant de meilleures données locales ou en prenant d'autres mesures directes dans une unité d'aménagement forestier particulière.

De nombreuses opérations forestières au Canada se déroulent dans des forêts imparfaitement drainées (basses terres) où prédominent les sols tourbeux (ou les sols organiques profonds). Dans ces conditions, les variations qui touchent la production de méthane (CH_4) et de CO_2 contribuent au bilan net des gaz à effet de serre. Pour l'heure, le Service canadien des forêts n'inclut pas systématiquement ce méthane ou la dynamique des tourbières dans le bilan du carbone, même s'il mène un programme dont le but est d'inclure les processus des tourbières (dans les forêts des basses terres) dans le modèle de bilan du carbone.

Tableau 1 : Teneur moyenne en carbone organique (kg m^{-2}) par province écoclimatique

Province	Horizons[a]	Horizons organiques[b]
Arctique	8,4 ± 1,0 (76)[c]	3,4 ± 0,6 (25)
Subarctique	7,6 ± 0,5 (154)	3,9 ± 0,2 (150)
Boréale Ouest	5,4 ± 0,2 (374)	2,7 ± 0,1 (370)
Boréale Est	7,3 ± 0,3 (286)	3,8 ± 0,2 (286)
Tempérée froide	10,5 ± 0,8 (86)	2,0 ± 0,3 (86)
Tempérée modérée	7,0 ± 0,8 (3)	1,6 ± 0,4 (3)
Herbages	9,3 ± 1,6 (7)	3,0 ± 0,7 (7)
Subarctique de la cordillère	13,9 ± 1,9 (16)	2,2 ± 0,3 (16)
Cordillère	8,5 ± 0,3 (326)	2,7 ± 0,1 (321)
Intérieur de la cordillère	7,5 ± 0,7 (67)	1,8 ± 0,2 (67)
Cordillère du Pacifique	23,2 ± 1,9 (67)	4,6 ± 0,4 (67)

[a] Tous les horizons sous la surface minérale.
[b] Tous les horizons au-dessus de la surface minérale. Les profils de l'ensemble des données ne comportent pas tous des données sur les horizons organiques au-dessus de la surface minérale. Ce résumé ne porte que sur les profils qui mesurent ou estiment l'horizon organique. Cela peut se traduire par une taille de l'échantillon qui diffère de celle du résumé relatif à l'horizon minéral.
[c] Erreur type moyenne ± de la moyenne (taille de l'échantillon).
(Source : Siltanen *et al.*, 1997)

7. Estimation des flux du carbone

Il existe trois façons de mesurer les flux du carbone dans une forêt donnée en fonction des variations des réservoirs de l'écosystème forestier :

a) comparer les inventaires successifs;

b) n'utiliser qu'un inventaire comme mesure de référence et mesurer les variations par rapport à cette mesure en additionnant les ajouts et les enlèvements;

c) mesurer les ajouts et les enlèvements seuls sans mesure de référence.

Les trois méthodes sont brièvement analysées ci-après. Comme nous l'avons vu plus haut, on utilise des méthodes de mesure directe des flux (en employant des tours, des chambres et des aéronefs) pour vérifier les modèles et leurs estimations, mais ces méthodes ne sont pas abordées dans ce rapport.

7.1 Comparaison des mesures de base successives

La section 6 ci-dessus explique la façon d'utiliser les inventaires forestiers pour estimer la quantité de carbone que renferme une station. Cette estimation peut facilement porter sur deux inventaires successifs ou plus afin d'en dégager les tendances dans le temps.

Avantages : manifestement, il s'agit de la méthode la plus facile; si le territoire forestier dispose d'un inventaire forestier régulièrement actualisé, il s'agit tout bonnement d'appliquer les coefficients de conversion à deux ou plusieurs inventaires. L'autre avantage réside dans le fait que les registres historiques peuvent servir à construire les tendances en remontant dans le temps.

Inconvénients : si l'on utilise différentes méthodes dans des inventaires successifs, cela risque d'introduire une erreur dans le calcul. Cette erreur risque d'être importante si les variations nettes de carbone dans les inventaires sont minimes par rapport à la quantité de carbone dans les inventaires. La méthode ne précise pas les principaux facteurs qui influencent les stocks de carbone dans un secteur donné, étant donné que toutes les pertes confondues résultant de l'exploitation, des perturbations naturelles et du déboisement sont regroupées ensemble. Par ailleurs, cette méthode ne fournit pas d'estimations des variations des stocks de carbone du sol. Ces estimations devront être établies séparément ou à l'aide de modèles.

7.2 Mesure de base additionnée des variations estimatives des stocks

En vertu de cette méthode, un seul inventaire sert de mesure de référence par rapport à laquelle on enregistre tous les écarts.

Ajouts : les ajouts de stocks de carbone aérien équivalent à la productivité nette de l'écosystème aérien; ces données figurent généralement dans les courbes d'accroissement en volume et sont résumées en estimations de l'accroissement moyen annuel. Il faut utiliser les coefficients de conversion de la figure 1 pour calculer les volumes de carbone. Il est fréquent que les courbes d'accroissement en volume ne remontent pas suffisamment loin dans le temps pour couvrir les premières années de développement d'un peuplement. Pour combler ces données manquantes, on peut tracer une courbe exponentielle allant de zéro à la première donnée simple. Même une ligne droite pourrait faire l'affaire; toute imprécision sera infime par rapport au volume de carbone global dans la forêt.

Pertes: les registres d'aménagement forestier contiennent généralement les données suivantes, qui sont toutes nécessaires :

- le volume de bois décimé par le feu, les insectes, les maladies et d'autres perturbations naturelles (en dehors du dépérissement normal du peuplement, lequel est saisi dans les courbes d'accroissement en

volume);

- le volume de bois récolté;
- le volume estimé des pertes attribuables au déboisement (construction de chemins, changement d'affectation des terres, barrages hydroélectriques et autres ouvrages d'aménagement, etc.). Il se peut que ces chiffres soient déjà saisis dans le volume exploité, auquel cas il n'est pas nécessaire de les comptabiliser ici même si la superficie déboisée aura pour effet de réduire la productivité future de l'assise territoriale.

Tous les chiffres ci-dessus sont généralement disponibles comme mesure du volume de bois. Les coefficients de conversion de la figure 1 doivent être utilisés pour estimer le poids du carbone ou du CO_2.

Ces calculs permettent une évaluation relativement précise des flux dans le réservoir de la biomasse sur pied. La mesure des variations des réservoirs de carbone du sol est un peu plus compliquée. Se reporter à la section 8 pour un bref aperçu du Modèle de bilan du carbone élaboré par le Service canadien des forêts. Voir également à la section 9 une analyse de la façon de suivre les flux du carbone par le biais des réservoirs de produits forestiers.

Avantages : cette méthode relativement précise, est essentiellement utilisée dans la plupart des modèles du bilan du carbone. Les données existent généralement.

Inconvénients : le Modèle de bilan du carbone du SCF n'est pas encore à la disposition générale des aménagistes forestiers et, même si les hypothèses qu'utilise le modèle sur la façon dont le carbone entre dans le réservoir du sol et s'en échappe sont disponibles, les calculs seraient extrêmement laborieux avec l'actuelle version axée sur la recherche.

7.3 Mesure du flux seul (production nette du biome)

Il est également possible de comptabiliser le carbone sans mesure de référence, tout bonnement en consignant les effets nets des ajouts et des enlèvements et en en rendant compte comme la variation de stockage du carbone.

Avantages : cette méthode présente particulièrement d'attrait lorsque l'inventaire forestier de base affiche d'importantes lacunes. En effet, elle ne prétend pas offrir une mesure absolue du carbone (qui serait sans doute éminemment imprécise) mais elle mesure les variations des stocks de carbone sur des intervalles bien précis.

Inconvénients : les variations des stocks de carbone ne peuvent être indiquées qu'en termes absolus (en tonnes de carbone perdu ou gagné) et non pas en pourcentage du réservoir de carbone total. Cela peut être ou non, un inconvénient de taille.

7.4 Conclusion

La section précédente décrit, dans les termes les plus simples possible, le « coeur » de tout système de budgétisation du carbone.

En général, la plupart des aménagistes forestiers qui disposent d'un inventaire précis utiliseront principalement la méthode de mesure de base et de calcul du flux car c'est celle qui concorde le mieux avec les pratiques en vigueur ailleurs. Toutefois, la mesure du flux seul peut être une option attrayante dans les forêts qui ne disposent pas d'un inventaire forestier suffisant vu que cela répond aux prescriptions de base de la comptabilisation du carbone. La simple comparaison des mesures de base peut servir de calcul préliminaire ou, si l'on dispose d'informations suffisantes dans l'inventaire, elle peut servir à établir les tendances historiques brutes.

En conclusion, il n'y a rien de particulièrement complexe sur le plan technique ou de prohibitif dans la comptabilisation du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier (UAF).

Manifestement, un système de comptabilisation ne peut pas être plus précis que les données qu'il

contient. Même une UAF disposant de données actualisées risque d'afficher un certain nombre de lacunes, d'erreurs et d'incertitudes. Est-il cependant préférable d'attendre l'apparition de données parfaites ou vaut-il mieux se mettre de la partie et obtenir à relativement peu de frais et d'efforts les meilleures estimations que l'on peut extraire des données actuellement disponibles, et utiliser ces données préliminaires pour orienter les efforts afin d'améliorer et de peaufiner les estimations?

8. Carbone des produits forestiers

Les activités d'aménagement forestier peuvent avoir de profondes répercussions sur le volume de carbone stocké dans les produits forestiers, lequel dépend du volume de produits fabriqués, des types de produits fabriqués, de l'utilisation desdits produits et des méthodes employées pour s'en débarrasser ou pour les recycler. Le suivi des variations nettes du réservoir des produits forestiers oblige à tenir compte des facteurs décrits dans cette section qui sont intégrés dans les modèles de bilan du carbone du SCF (MBC-SCF2 et MBC-SPF) décrits à la section 9 ci-après.

8.1 Calcul des contributions initiales au réservoir de carbone des produits forestiers

Cela peut se faire de deux façons : selon le volume récolté ou selon la productivité des scieries.

La **méthode du volume récolté** peut être utilisée si l'on connaît l'utilisation prévue du bois récolté. En premier lieu, il faut appliquer le taux d'utilisation approprié au volume de bois récolté (le Modèle de bilan du carbone du SCF utilise 80 % à 85 % du volume de bois de tige marchand). On peut ensuite formuler un certain nombre d'hypothèses sur ce qu'il advient de ce bois. Le MBC-SPF décrit une série d'hypothèses au sujet de différents produits forestiers. Voici l'une des plus complexes en guise d'illustration :

« Des billes de sciage de résineux et des grumes de placage sont transformées en bois d'oeuvre ayant un rendement présumé de 45 %. Sur le bois d'oeuvre produit, 70 % est utilisé dans la construction et 30 % comme " autre bois ", y compris comme palettes, boiseries et bois d'emballage. Les produits dérivés des procédés de conversion appartiennent à trois catégories, selon la répartition suivante:

1. 10 % sert à la production de panneaux (que l'on ajoute au réservoir " autre bois ");
2. 45 % sert à la fabrication de copeaux à pâte;
3. le solde de 45 % est traité comme résidu, deux tiers étant brûlés comme déchets et un tiers comme source d'énergie. »

On pourrait formuler des hypothèses plus précises en fonction des utilisations locales, mais cela permet de se faire une idée du niveau de précision du Modèle du SCF.

La **méthode de la productivité des scieries** consiste tout bonnement à consigner le volume de production des diverses scieries d'une UAF donnée. Cette méthode évite d'avoir à formuler les diverses hypothèses décrites plus haut, mais elle comporte des complexités qui lui sont propres. En premier lieu, il faut des coefficients pour convertir le poids de différents produits forestiers en poids de carbone. Par ailleurs, il faut répondre à un certain nombre de questions parfois complexes sur le flux de bois brut qui entre et sort d'une UAF donnée. Quel volume du bois récolté dans une forêt donnée est transformé dans cette unité et quel volume en est exporté? Quel volume du bois traité dans une ou dans plusieurs scieries dont on suit la production provient de l'unité d'aménagement forestier et quel volume provient d'ailleurs? Dans certaines unités, cette question peut être relativement simple alors que dans d'autres, il est beaucoup plus difficile d'y répondre.

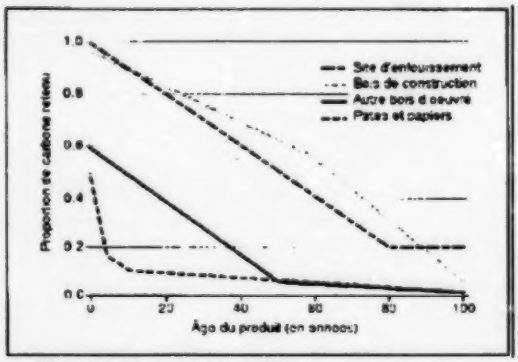
8.2 Rythmes de décomposition des produits forestiers

Les produits forestiers se décomposent selon

diverses cadences, le carbone retournant alors dans l'atmosphère. La figure 2 est extraite du rapport décrivant les hypothèses utilisées dans le Modèle de bilan de carbone du SCF (Kurz *et al.*, 1992). Elle atteste que différents produits forestiers ont une longévité différente et un taux d'utilisation préliminaire différent.

Le modèle présuppose que les billes à pâte sont transformées en papier moyennant un rendement moyen approximatif inférieur à 50 %, et qu'environ 50 % de ce qui est fabriqué est perdu dès la première année. Le modèle émet toute une diversité d'hypothèses différentes sur ce qu'il advient du carbone qui quitte le réservoir d'un produit donné (une partie se décompose, une partie est utilisée comme bioénergie, une partie est recyclée et une partie aboutit dans les sites d'enfouissement où 20 % de ce qui est enfoui conserve son carbone indéfiniment). Le bois de construction en revanche a un taux d'utilisation beaucoup plus élevé de même qu'une plus grande longévité et il faut 60 ans pour que les déperditions de carbone atteignent 50 %.

Figure 2 : Courbes de rétention du carbone correspondant à trois catégories de produits forestiers (bois de construction, autre bois d'oeuvre et produits de pâte) et aux produits forestiers dont on se débarrasse dans des sites d'enfouissement



(Source: Kurz *et al.*, 1992)

Le MBC-SPF tient compte de l'énergie et des autres émissions découlant de l'aménagement actif des forêts, notamment de la préparation du site, de la plantation, de la fertilisation, de l'éclaircie commerciale, de l'abattage, du transport jusqu'aux scieries, de la transformation et du transport jusqu'aux marchés. Pour ce faire, il faut d'autres données sur les scieries et le secteur qui quantifient ces activités (et ces données, même si elles sont généralement exclusives, sont d'accès facile). Ces émissions peuvent avoir une incidence profonde sur le bilan net du carbone (total) de l'usine locale de même qu'à l'échelle nationale (Apps *et al.*, 1999).

9. Modélisation du bilan du carbone

Les modèles de bilan du carbone sont utiles et importants pour au moins trois raisons différentes :

1) ils permettent aux aménagistes d'établir des estimations éclairées sur les changements qui surviennent dans les réservoirs de carbone et qu'il est impossible de mesurer directement, en particulier les réservoirs de carbone du sol;

2) ils permettent aux aménagistes de comparer différents scénarios d'aménagement pour mieux comprendre l'impact des décisions d'aménagement sur le stockage du carbone dans les forêts;

3) ils permettent aux aménagistes de prédire ces valeurs dans l'avenir.

Ces modèles jouent un autre rôle qui retient de plus en plus l'attention des chercheurs qui se spécialisent dans le changement climatique, à savoir la prévision des incidences possibles ou probables du changement climatique sur les forêts, la santé des forêts et le stockage du carbone forestier. En effet, ces modèles peuvent comporter des scénarios qui tiennent compte des changements de grande envergure sur lesquels l'aménagiste forestier n'exerce aucun contrôle mais qui lui fournissent certains indices sur les stratégies d'adaptation possibles.

Comme toujours, un modèle ne peut pas être supérieur à ses éléments et aux hypothèses qu'il

contient. Même si les éléments et les hypothèses sont éminemment précis, on court toujours le risque de voir surgir des événements ou des changements imprévus en vertu desquels la réalité différera du modèle. Même si la capacité prévisionnelle d'un modèle peut être faible (surtout sur les horizons temporels d'au moins 100 ans qu'on utilise), celui-ci peut être très utile pour évaluer les options d'aménagement actuelles.

Quantité de modèles de bilan du carbone sont utilisés dans le monde entier. Chacun a des caractéristiques qui lui sont propres, chacun exige différents éléments et différentes hypothèses pour prévoir la dynamique future du carbone et chacun assure différents niveaux de couverture en termes de ce qui est inclus et de ce qui ne l'est pas.

On trouvera dans cette section une brève présentation du modèle de bilan de carbone mis au point par le Service canadien des forêts. Cela ne veut pas dire qu'il s'agisse du seul ou du meilleur modèle existant, mais s'il est analysé ici, c'est qu'il a toutes les chances d'être accessible aux aménagistes forestiers de tout le Canada. Le modèle a été mis à l'épreuve et utilisé dans un certain nombre de situations différentes au Canada, et il continue d'être peaufiné en fonction des conditions propres au Canada.

9.1 Modèle de bilan du carbone du SCF

Le cadre de modélisation du bilan du carbone est décrit en détail dans plusieurs rapports que l'on peut se procurer auprès du Service canadien des forêts (p. ex., Kurz *et al.*, 1992; Kurz et Apps, 1999; Apps *et al.*, 1999). En bref, « le modèle estime les stocks et les flux de carbone dans/entre la biomasse forestière, les sols et les produits en utilisant les données extraites des inventaires forestiers, de la stratification des écosystèmes, des relevés pédologiques et d'autres statistiques gouvernementales et industrielles. Le modèle simule l'accroissement annuel d'une forêt et la décomposition du sol de types forestiers représentatifs en se basant sur des relations empiriques. Il permet de calculer les effets de perturbations (principalement les feux de forêt, les infestations d'insectes et la récolte) sur la structure d'âge des forêts et sur les rejets de carbone dans l'atmosphère et la couverture morte sur un cycle quinquennal » (Price *et al.*, 1997).

Dans sa version la plus récente, le cadre de modélisation du SCF comporte deux éléments: le Modèle de bilan du carbone - Secteur canadien des forêts 2 (MBC-SCF2 qui rend compte des variations des stocks de carbone dans l'écosystème forestier, c.-à-d. PEN et NBP) et le Modèle de bilan du carbone - Secteur des produits forestiers (MBC-SPF qui rend compte des variations dans le carbone stocké dans les produits forestiers ainsi que de la consommation et de la production d'énergie (bioénergie) dans le secteur forestier). Le cadre du MBC a été conçu à l'origine et utilisé pour estimer les bilans du carbone du secteur forestier du Canada en général. Le modèle incite à croire que les forêts du Canada ont été un puits de carbone important entre 1920 et le début des années 1970, après quoi elles sont devenues une source nette, perdant environ 69 Mt C par an entre 1985 et 1989 (Table du secteur forestier, 1998). Ce changement est attribuable principalement à la fréquence accrue des feux de forêt et des infestations d'insectes qui ont débuté dans les années 1970 (Kurz et Apps, 1999).

9.2 Applications locales du Modèle de bilan du carbone du SCF

Le cadre du MBC (MBC-SCF2 et MBC-SPF) a été modifié pour pouvoir être appliqué au territoire de la **Forêt modèle de Foothills** afin d'y utiliser des données locales plutôt que nationales. Le modèle ainsi modifié a été utilisé pour simuler et comparer le stockage du carbone sur plus de 250 ans, soit de 1958 à 2238, en fonction d'un certain nombre de scénarios différents, en comparant différents scénarios d'aménagement (notamment un scénario de « forêt non aménagée , avec aucune exploitation ») et en vérifiant la sensibilité des différentes

hypothèses utilisées pour faire tourner le modèle. L'étude démontre que l'aménagement d'une forêt pour la production de bois peut se traduire par un stockage de carbone supérieur à ce qui se passe dans un écosystème forestier naturel sous réserve que le régime d'aménagement obéisse à une révolution plus longue que le cycle des perturbations naturelles. Le « scénario de base » du modèle repose sur un cycle de perturbations naturelles de 50 ans dans la région de Foothills, même si des recherches plus récentes (et les résultats du modèle proprement dit) incitent à croire qu'il s'agit sans doute d'une sous-estimation importante (Price *et al.*, 1997).

Le modèle générique a également été utilisé dans un certain nombre de **forêts hypothétiques** couvrant chacune 100 000 hectares et comportant des paysages représentatifs du littoral et de l'intérieur de la C.-B. ainsi que de la forêt boréale en Ontario (Kurz *et al.*, 1998). Dans chaque cas, on a procédé à une comparaison entre une « forêt non aménagée » soumise à un cycle de perturbations naturelles d'une durée se situant entre 80 et 400 ans et une forêt aménagée dont l'âge d'exploitabilité varie de 100 à 400 ans. Au risque d'une sursimplification des choses, le modèle a permis de constater que lorsque l'âge d'exploitabilité est le même que le cycle de perturbations naturelles, on note une baisse modérée du stockage du carbone, essentiellement parce que la récolte se fait de préférence dans des vieux peuplements alors que le feu s'attaque à tous les peuplements qui dépassent une densité seuil minimum. Lorsque l'âge d'exploitabilité est nettement plus court que le cycle de perturbations naturelles (comme dans les forêts du littoral de C.-B.), le régime d'aménagement peut réduire de jusqu'à 42 % le stockage du carbone.

9.3 Modèle de bilan du carbone d'application universelle

Les travaux mentionnés ci-dessus prouvent que le Modèle de bilan du carbone du SCF est applicable au niveau de l'UAF. Le modèle proprement dit n'est toutefois pas considéré comme « convivial » et il ne peut pas être utilisé dans une forêt particulière sans la participation active de ses concepteurs. Cependant, moyennant des modifications relativement modestes on pourrait en tirer une version « clés en main » qui pourrait facilement être utilisée par d'autres (Apps, communication personnelle).

10. Forêts, aménagement durable des forêts et changement climatique

En définitive, la modélisation du bilan du carbone n'aura véritablement de sens pour les aménagistes forestiers que s'ils disposent de mesures pratiques pour s'attaquer au dossier du changement climatique. Même s'il existe effectivement quantité de mesures, il importe d'émettre quelques mises en garde sur le rôle limité que les forêts peuvent jouer pour atténuer le changement climatique.

Saturation : Le rôle général que les forêts peuvent jouer pour atténuer le changement climatique est limité par le territoire disponible et le maximum pratique de carbone qui peut être stocké dans ce territoire (Schlamadinger et Marland, 2000). Cela veut dire que les activités d'aménagement forestier offrent au mieux une stratégie de transition vers un authentique avenir à faible teneur en carbone; mais en attachant trop d'importance aux puits forestiers, on risque de retarder les résultats de mesures à long terme plus efficaces.

Instabilité : Le stockage du carbone dans les forêts est sans doute réversible à cause d'activités naturelles et anthropiques futures, qu'il faut distinguer des activités qui contribuent à réduire la consommation de combustibles fossiles

(GIEC, RSATCF, 2000). C'est pour cette raison qu'il ne faut pas croire qu'une tonne de carbone séquestrée équivaille à une tonne d'émissions en moins.

Il y a des chances pour que le Protocole de Kyoto (même si ses conditions n'ont pas encore été définies) permette d'obtenir des crédits au titre des activités qui présentent un avantage au cours de la première période d'engagement (2008-2012) mais qui n'offriront pas forcément cet avantage à long terme. Mentionnons à titre d'exemple l'établissement de plantations à croissance rapide, capables de séquestrer d'importants volumes de carbone à court terme (quelques décennies), même si c'est précisément la croissance rapide de ces plantations qui les rend particulièrement vulnérables aux problèmes de saturation et d'instabilité.

Il existe néanmoins toute une variété d'activités d'aménagement forestier qui offrent d'authentiques possibilités d'améliorer la capacité des forêts et des produits forestiers à stocker le carbone à plus long terme (>100 ans). Citons entre autres :

- l'aménagement en fonction d'un âge d'exploitabilité plus long, ce qui a pour effet d'accroître le pourcentage global de forêts à volume élevé sur le territoire;
- la coupe de jardinage ou l'éclaircie précommerciale qui a pour effet d'enlever certains produits forestiers tout en laissant un volume important sur place;
- la protection des forêts contre le feu, la maladie et les insectes;
- l'établissement d'aires protégées;
- la diminution du déboisement pour des fins de conversion des terres et de construction de chemins;
- les activités sylvicoles qui ont pour effet d'accroître et de protéger le carbone du sol;
- l'implantation de nouvelles forêts, principalement de plantations brise-vent et d'autres terres converties en couverture forestière permanente;
- la promotion des forêts urbaines;
- la modification de la gamme des produits forestiers en faveur de produits plus longévifs.

Parmi les autres mesures, mentionnons la diminution directe de la consommation de combustibles fossiles, en favorisant l'utilisation des arbres comme source d'énergie verte et en améliorant le rendement énergétique dans toute la chaîne des produits forestiers, depuis l'établissement d'un peuplement jusqu'à l'exploitation, le transport, la fabrication, la mise en marché, la consommation, le recyclage et l'élimination des produits. Bon nombre des activités d'aménagement forestier mentionnées ci-dessus engendrent des recettes d'exploitation, même si elles ne maximisent pas forcément les recettes directes par hectare. La plupart d'entre elles ont des retombées secondaires sur le plan social, économique non ligneux et sur celui de la biodiversité. Toutes font partie de l'« amalgame » de mesures que les aménagistes forestiers peuvent envisager pour passer à l'aménagement durable des forêts, et toutes offrent la possibilité d'avantages environnementaux à long terme en vertu d'une augmentation du stockage du carbone.

11. Principaux messages et recommandations

À l'intention des aménagistes forestiers :

1. *La mesure du carbone et des flux du carbone au niveau de l'unité d'aménagement forestier n'est pas une tâche difficile sur le plan technique, et elle peut se faire avec des données facilement accessibles à la plupart des aménagistes*

forestiers.

2. *Même si les mesures préliminaires risquent d'être légèrement imprécises et qu'elles peuvent ne pas porter sur tous les réservoirs de carbone, cela n'entame nullement leur utilité pour les aménagistes forestiers qui souhaitent intégrer une certaine connaissance des problèmes du changement climatique dans leurs évaluations, leurs plans, leurs activités de surveillance et leurs rapports.*

3. *Les aménagistes forestiers doivent utiliser les meilleures données disponibles au lieu d'attendre que des données « parfaites » ne le deviennent. Un premier bilan constitue la meilleure façon d'obtenir l'engagement de peaufiner et d'améliorer les estimations préliminaires.*

4. *Plusieurs rapports, que l'on peut se procurer auprès du Centre de foresterie du Nord du Service canadien des forêts, contiennent suffisamment d'informations pour commencer. « Le bilan du carbone du secteur forestier canadien » (Kurz et al., 1992, Rapport d'information NOR-X-326) donne un excellent aperçu du modèle de bilan du carbone du SCF, tandis que « A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra minerals soils » (Siltanen et al., 1997) fournit les données nécessaires sur les profils pédologiques régionaux. Au nombre des autres rapports, il faut citer : « Une analyse rétrospective sur 70 ans des flux du carbone dans le secteur forestier canadien » (Kurz et Apps, 1999) et « Le bilan du carbone du secteur canadien des produits forestiers » (Apps et al., 1999). On trouvera les facteurs de conversion du carbone à la figure 1 ci-dessus (page 5). Les autres données dont on a besoin pour commencer (volume de bois, courbes d'accroissement en volume, données sur l'exploitation et les perturbations naturelles) sont disponibles localement.*

5. *Il existe plusieurs activités d'aménagement des forêts qui permettent d'accroître la capacité des forêts à stocker du carbone et qui concordent avec l'aménagement forestier durable. Les méthodes à long terme qui ont pour effet d'accroître le stockage global du carbone (mesuré en tonnes/hectare/an et établi en moyenne sur au moins un siècle) présentent plus d'intérêt que les méthodes qui se concentrent essentiellement sur l'accroissement du taux de séquestration à court terme.*

À l'intention du Réseau de forêts modèles :

6. *Le Réseau de forêts modèles est en fort bonne posture pour jouer un rôle de premier plan dans l'élaboration d'un modèle universel du bilan du carbone qui pourra facilement être utilisé par n'importe quel aménagiste forestier moyennant des données facilement disponibles. Le Service canadien des forêts possède déjà la plupart des éléments nécessaires à la création d'un modèle universel crédible et facile à utiliser, et le soutien et le concours du Réseau de forêts modèles pourrait contribuer à en faire une priorité.*

12. Remerciements

L'auteur de ce rapport remercie de son appui le Comité consultatif stratégique sur les indicateurs locaux du Réseau canadien de forêts modèles qui lui a octroyé des subventions de voyage pour l'aider à faire ses recherches dans le cadre de ce rapport. David Price (Service canadien des forêts) a apporté une contribution particulièrement précieuse en expliquant bon nombre des paramètres du Modèle de bilan du carbone du SCF, de même que Mike Apps (Service canadien des forêts) et Werner Kurz (Essa Technologies Ltd). Taumey Mahendrappa (Service canadien des forêts) a fourni d'utiles renseignements sur ses recherches dans les Maritimes, tandis que Darrell Harris (Service des forêts de Terre-Neuve) a expliqué en détail l'utilisation des inventaires

forestiers. Mike Apps, Ed Banfield, Jag Bhatti, Zhong Li et David Price ont lu la première version de ce rapport et ont fourni de précieux conseils, même si l'auteur reste seul responsable des erreurs qui ont pu s'y glisser. Enfin, l'auteur tient à remercier Brian Bonnell (Service canadien des forêts) de ses encouragements pour entreprendre un tel projet et de son aide pour le mener à bien.

13. Bibliographie

—— (1992) United Nations Framework Convention on Climate Change.

Apps, M.J., W.A. Kurz, S.J. Beukema, and J.S. Bhatti. 1999. Carbon budget of the Canadian forest product sector. *Environmental Science and Policy* 2: 25-41.

Apps, Michael J. and Marsden, Jenni (eds.) (2000) The Role of Boreal Forests and Forestry in the Global Carbon Budget (Abstracts). Canadian Forest Service, May 2000.

Binkley, C.S., M.J. Apps, R.K. Dixon, P. Kauppi, and L-O. Nilsson. 1998. Sequestering carbon in natural forests. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 27: S23-45.

Canadian Council of Forest Ministers (1997) Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management in Canada: Technical Report. Natural Resources Canada, 1996.

Forest Sector Table (1998) Foundation Paper: A Survey of the Forest Sector and Forest Sector Options. Natural Resources Canada, October 1998.

Forest Sector Table (1999) Options Report: Options for the Forest Sector to Contribute to Canada's National Implementation Strategy for the Kyoto Protocol. Natural Resources Canada, November 1999.

IPPC. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Organization for Economic Cooperation and Development and International Energy Agency.

IPCC (2000) Special Report on Land Use, Land-use Change and Forestry, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.

Kurz, W.A., Apps, M.J., Webb, T.M. and McNamee, P.J. (1992) The carbon budget of the Canadian forest sector: Phase I. Natural Resources Canada Information Report NOR-X-326, 1992.

Kurz, Werner A. And Apps, Michael J. (1999) A 70-Year Retrospective Analysis of Carbon Fluxes in the Canadian Forest Sector. *Ecological Applications* 9(2), pp 526-547.

Kurz, Werner A., Beukema, Sarah J. and Apps, Michael J. (1998) Carbon Budget Implications of the Transition from Natural to Managed Disturbance Regimes in Forest Landscapes. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 2, pp 405-421.

Kurz, Werner A. (1999) Assessing Options for Measurement of Verifiable Changes in Carbon Stocks from reforestation, Afforestation, and Deforestation and Other Potential Forestry Activities. Prepared by Essa Technologies Ltd. For the Sinks Table, June 22, 1999.

Mahendrappa, M.K. and Pitt, C.M. (2000) Organic Horizon Thickness: An Indicator of Sustainable Forest Management in the Maritime Provinces. Final Report on Criteria and Indicators Group 4 - Carbon Sequestration in the Forests. Submitted to the Fundy Model Forest. March 2000,.

Price, David T., Apps, Michael J., Kurz, Werner A., Wesbrook, Michael, and Curry, R. Sean (1994) A "Model Forest Model": Steps Toward Detailed Carbon Budget Assessments of Boreal Forest Ecosystems. *World Resources Review*, Vol. 6,

No. 4, 1994, pp 461-476

Price, David T., Mair, Ralph M., Kurz, Werner A., and Apps, Michael J. (1996) Effects of forest management, harvesting and wood processing on ecosystem carbon dynamics: a boreal case study. *NATO ASI Series*, Vol I 40 pp 279-292

Price, D.T., Halliwell, D.H., Apps, M.J., Kurz, W.A., and Curry, S.R. (1997) Comprehensive assessment of carbon stocks and fluxes in a Boreal-Cordilleran forest management unit. *Canadian Journal of Forest Research* 27: pp 2005-2016

Price, David T., Apps, Michael J., and Kurz, Werner A. (1998) Past and Possible Future Carbon Dynamics of Canada's Boreal Forest Ecosystems. From G.M. Kohlmaier, M. Weber and R.A. Houghton (eds), Carbon Dioxide Mitigation in Forestry and Wood Industry, 1998, Springer, Berlin Heidelberg, pp 63-88.

Robinson, G.C., Peterson, E.B., Smith, S.M. and Nagle, G.S. (1999) Estimating the carbon sequestration associated with reforestation in western Canada. Submitted by Nawitka Renewable Resource Consultants to the Forest and Sinks Tables, June 11 1999.

Schlamadinger, B. and Marland, G. (2000) Land Use and Global Climate Change: Forests, Land Management, and the Kyoto Protocol. Pew Center on Global Climate Change, June 2000.

Siltanen, R.M., Apps, M.J., Zoltai, S.C., Mair, R.M. and Strong, W.L. (1997) A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils. Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 1997.